

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ GaAs/AlGaAs СВЕРХРЕШЕТОК С ОПТИЧЕСКИ ВОЗБУЖДЕННЫМИ НОСИТЕЛЯМИ ЗАРЯДА ДЛЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО НАБЛЮДЕНИЯ УСИЛЕНИЯ ТГц ИЗЛУЧЕНИЯ

Н.В.Демарина

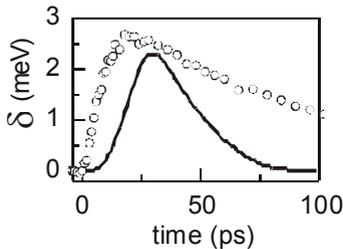
Нижегородский госуниверситет

Свойство полупроводниковой сверхрешетки, усилить внешнее терагерцовое (ТГц) электрическое поле в широком частотном диапазоне [1], сделало притягательной идею создания на её основе генератора ТГц излучения. Однако оказалось, что электрическое поле при превышении некоторого критического значения в сверхрешетке не остается однородным, и распадается на домены. В неоднородном поле электронный ансамбль теряет свойство временной когерентности и экспериментальное наблюдение усиления ТГц излучения сверхрешеткой затруднено. Поэтому до сих пор убедительных экспериментов, подтверждающих это свойство сверхрешетки, поставлено не было. Нами будет рассмотрена одна из возможных схем эксперимента [2], построенная из соображений предотвращения формирования доменов сильного поля в структуре. Носители заряда возбуждаются импульсом фемтосекундного лазера в нелегированной сверхрешетке, к которой приложено постоянное смещение. Используется тот факт, что интервал времени, в течение которого носители удаляются из структуры приложенным электрическим полем, мал по сравнению с характерным временем формирования большой неоднородности поля. В данной работе с помощью метода Монте-Карло для ансамбля частиц было смоделировано движение носителей заряда в сверхрешетке после их оптического возбуждения. Теоретический анализ показал, что электрическое поле в сверхрешетке остается приблизительно однородным в течение всего интервала времени, пока в ней присутствуют носители заряда, таким образом схема с оптически возбужденными носителями может использоваться для дальнейших экспериментов по наблюдению усиления ТГц излучения сверхрешеткой. Был положен метод крупных частиц, базирующийся на процедуре Монте-Карло [3]. Для расчета электрического поля в структуре на каждом временном шаге решалось уравнение Пуассона. На краях структуры для носителей применялись циклические граничные условия.

Объектом исследования являлась используемая для дальнейших экспериментальных измерений GaAs/Al_{0,3}Ga_{0,7}As сверхрешетка с периодом 8.4 нм (6.7 нм/1.7 нм) и длиной 350 нм. Предполагалось, что в результате действия импульса фемтосекундного лазера в структуре мгновенно генерируются электроны в первой минизоне в зоне проводимости и тяжелые и легкие дырки в соответствующих первых минизонах для легких и тяжелых дырок в валентной зоне. Носители рождаются вблизи дна минизон. Ширина минизон рассчитывалась по модели Кронига-Пенни и составляла 37.8 мэВ для электронов, 37.2 и 1 мэВ для легких и тяжелых дырок соответственно. Отношение концентраций легких и тяжелых дырок выби-

ралось равным 1/2. Предполагалось рассеяние носителей заряда на акустических и оптических фононах. Все расчеты проводились для охлажденных образцов (10 К).

На первом этапе теоретического анализа был произведен расчет распределения концентрации носителей заряда и электрического поля после возбуждения носителей импульсом лазера и анализировалась эволюция этих распределений во времени в сверхрешетке в постоянном поле. Было установлено, что в зависимости от напряженности поля в структуре легкие носители покидают структуру за 50-100 пс. В процессе их дрейфа электрическое поле не демонстрирует роста флуктуаций, если концентрация возбуждаемых электронов не превышает $5 \times 10^{15} \text{ см}^{-3}$. В то же время распределение поля меняется от однородного в начальный момент до линейно изменяющегося вдоль структуры, после того как быстрые носители покинут структуру, и в ней останутся только тяжелые дырки. Перепад электрического поля от одного края структуры до другого в конечном состоянии зависит от поля, приложенного к сверхрешетке, и для полей менее 50 кВ/см не превышает 10 кВ/см.



На втором этапе было проведено сравнение результатов, получаемых теоретически с экспериментальными данными [2]. В эксперименте измерялся спектр фототока, текущего через структуру в зависимости от времени. Известно, что положение максимума в спектре фототока, соответствующего экситону hh_1 зависит от величины электрического поля, приложенного к сверхрешетке. Таким образом, измеряя положение этого максимума во времени после возбуждения носителей заряда, можно судить об эволюции распределения электрического поля в сверхрешетке. На рис. представлены зависимости положения максимума в спектре фототока от времени, полученные экспериментально (символы) и теоретически (сплошная линия) при приложенном поле 20 кВ/см. Видно, что максимум спектра фототока в случае теоретических расчетов качественно повторяет поведение максимума при эксперименте, что подтверждает правильность используемой теоретической модели, но максимум смещается медленнее, чем получается в результате измерений. Последнее означает более медленный дрейф носителей в приложенном поле, получаемый в результате моделирования, чем в реальности. Таким образом, в реальных структурах немаловажную роль играет не только рассеяние электронов на оптических и акустических фононах, как мы предполагали в модели, но и рассеяние носителей заряда на несовершенствах границ раздела между слоями сверхрешетки.

Работа была выполнена при поддержке программы «Развитие научного потенциала высшей школы» Федерального агентства по образованию (проект 4629).

[1] Ктиторов С.А. и др. //ФТТ. 1971. Т.13. С.2230.

[2] Lisauskas A. *et al.* //Appl. Phys. Lett. 2005. V.86. P.102103.

- [3] Хокни Р., Иствуд Дж. Численное моделирование методом частиц. - М.: Мир, 1987, 640 с. анализ и синтез антенного дуплексора на приповерхностных акустических волнах

М.Ю. Двошерстов, В.И. Чередник, В.А. Савин

Нижегородский госуниверситет

В оконечных каскадах связанных приемников, в том числе, систем AMPS, GSM, CDMA, а также в приемопередающих устройствах мобильной связи используются антенные дуплексоры. Дуплексоры это двухканальные фильтры (передающий T_x -фильтр и принимающий R_x -фильтр), которые осуществляют разделение по частоте тракта передачи и приема. Дуплексор имеет один вход, соединенный с антенной, и два выхода, присоединенных к выходу передающего тракта и ко входу приемного тракта, соответственно. При этом частотные характеристики в передающем и приемном трактах имеют специальные характеристики для обеспечения максимальной развязки между трактом приема и передачи [1].

Для получения предварительно заданной амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) T_x и R_x фильтра блок-схема антенного дуплексора обычно строится на основе лестничного фильтра (см. рис. 1). Его импедансными элементами (IE_n) являются одно-, двухвходовые резонаторные акустические фильтры (см. рис. 2), работающие на приповерхностных акустических волнах (ППАВ) и представляющие из себя либо протяженные встречно-штыревые преобразователи (ВШП), либо ВШП совместно с протяженными отражающими элементами ОЭ (металлические электроды, нанесенные на поверхность пьезокристаллической подложки).

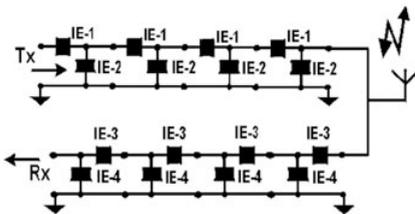


Рис. 1

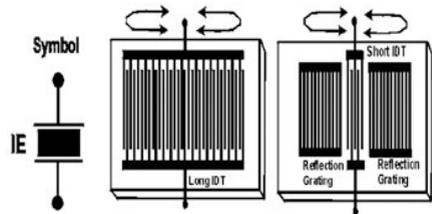


Рис. 2

В настоящей работе предложена методика анализа и синтеза акустоэлектронного дуплексора на ППАВ с заданными техническими характеристиками. Разработан алгоритм и пакет прикладных программ, позволяющий производить непосредственный расчет заданного АЧХ лестничного T_x и R_x фильтра с любым набором импедансных элементов IE_n , эквивалентная схема которых представляет из себя LCR -контур с элементами Ln , Cn , Rn и C_0 , величина которых определяет форму заданной АЧХ. При этом варьировалось количество элементов IE_n , а также их проводимость $Y_{en} = j\omega C_0 + Y_n$, где $Y_n = 1/Z_n$, $Z_n = R_n + j\omega L_n + 1 / (j\omega C_m)$, $\omega = 2\pi F$, F – частота. Интерфейс программы, которая вычисляет частотный отклик лестничного фильтра, используя выражения, данные выше, показаны на рис. 3.

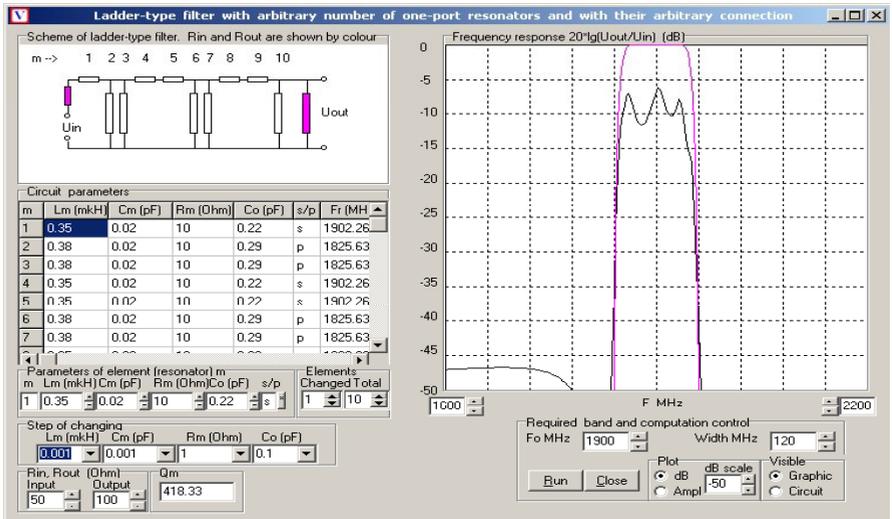


Рис. 3

Далее был составлен алгоритм и программа, позволяющая рассчитывать проводимость каждого отдельного импедансного элемента IE_n , представляющего собой одноходовый резонансный фильтр на ППАВ (см.рис.2). Используя методику многомерного глобального поиска экстремума функции цели Φ_{12} [2], автоматически подбиралась топология каждого резонансного фильтра, соответствующая наперед рассчитанной ранее проводимости Y_{en} каждого элемента IE_n . Вычисления проводимости Y каждого одноходового резонатора осуществлялись с помощью СОМ-теории [1]. Варьируя топологию каждого акустического резонатора (период ВШП и ОЭ, их длина, ширина промежутка, толщина электрода, коэффициент металлизации, апертура ВШП, скорость ПАВ в пьезокристалле (36-УХ LiTaO₃)) программа позволяет получить совпадение проводимости Y каждого акустического резонатора с проводимостью Y_{en} каждого элемента IE_n эквивалентной схемы. В результате была получена блок-схема T_x и R_x – фильтра и соответственно топология каждого одноходового резонансного фильтра, которая соответствовала заданной АЧХ дуплексора на ППАВ.

- [1] Ken-ya Hashimoto Surface acoustic wave devices in telecommunications. Springer, 2000, P. 329
- [2] Двошерстов М.Ю., Чередник В. И., Чириманов А. П. //Изв. ВУЗов. Радиофизика. 2000. Т. XLIII, №9. С. 801.

SH-ВОЛНЫ В ПЬЕЗОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ

М.Ю.Двошерстов, В.И.Чердник

Нижегородский госуниверситет

Известно, что если сагиттальная плоскость (X_1X_3 , X_1 -направление распространения волны, X_3 -перпендикуляр к поверхности кристалла) перпендикулярна кристаллографической оси двукратного вращения кристалла, то для таких условий симметрии характеристическое уравнение Кристоффеля [1], которое получается из связанных уравнений теории упругости для пьезосреды становится вырожденным. В случае выполнения условия:

$$C_{14}=C_{16}=C_{34}=C_{36}=C_{45}=C_{56}=0, e_{11}=e_{13}=e_{15}=e_{31}=e_{33}=e_{35}=0 \quad (1)$$

где C_{ij} , e_{ij} – тензоры упругих и пьезоэлектрических констант пьезокристалла, записанные в сокращенной матричной форме, одно из независимых решений будет для пьезоактивной волны поперечной поляризации (SH-волна), имеющей одну поперечную компоненту смещения и электрический потенциал (u_2, φ).

В данной работе были рассчитаны характеристики поверхностных акустических волн SH-типа, распространяющихся в пьезокристаллах LGS, LGN и LGT ориентаций (0° , $\theta=10-30^\circ$, 90°) и ST- 90° , X пьезокварца, записанных в углах Эйлера (ϕ, θ, ψ). На рис.1 показаны рассчитанные фазовые скорости (кривые LGS, V; LGN, V; LGT, V) и коэффициент электромеханической связи (LGS, k2; LGN, k2; LGT, k2) в зависимости от второго угла Эйлера θ , а на рис. 2 их температурные коэффициенты задержки (ТКЗ) (кривые LGS, LGN, LGT).

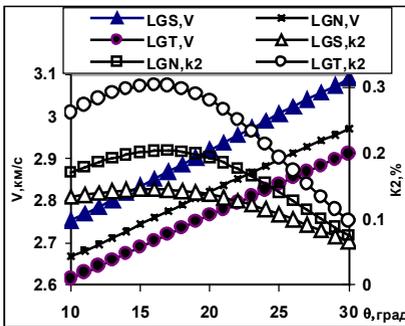


Рис.1

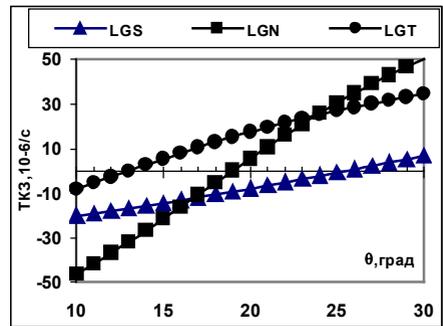


Рис.2

Этот тип SH-волн в данных кристаллах следует отнести к известной волне Гуляева-Блюстейна (Г-Б) [1], поскольку величина скорости волны Г-Б лежит около скорости медленной сдвиговой объемной волны V_{t1} в том же направлении.

Одна из особенностей SH- волны, распространяющейся в ST-X-90⁰ (ориентация 0°, 132.75°, 90°) кварце является ее высокая фазовая скорость ($V_{SH} = 4.993$ км/с), которая лишь незначительно меньше, чем скорость быстрой объемной сдвиговой волны V_{t2} с той же поперечной поляризацией, распространяющихся в том же направлении $V_{t1}=3794$ км/с $< V_{SH} < V_{t2}=5055$ км/с, V_{t1} - фазовая скорость медленной сдвиговой объемной волны.

Хорошо известно, что волны со скоростями в этом интервале скоростей относятся к псевдоповерхностным поперечным волнам. Авторы работы [2] в некоторых своих публикациях так и называют используемую ими волну в ST-X-90° срезе. Отличительной особенностью таких волн является наличие затухания вдоль направления распространения. Но у данной волны затухание отсутствует, следовательно, она не может быть отнесена к псевдоповерхностным волнам. Согласно существующим представлениям эта волна не относится также и к чистым поверхностным волнам, так как эти волны должны иметь скорости, меньшие, чем скорость медленной поперечной объемной волны. Условию вырождения указанного ST-X-90° среза удовлетворяют также волны Г-Б, но эти волны также не относятся к псевдоповерхностным и также должны иметь скорость ниже скорости медленной объемной волны, хотя и гораздо ближе к ней, чем скорости обычных SAW. Граничным условиям на свободной поверхности могут удовлетворять также скользящие объемные волны (SSBW). Эти волны могут иметь скорости выше, чем скорость медленной объемной волны, и нулевое затухание распространения, если один из корней характеристического уравнения равен нулю, а остальные отрицательны.

Используя известную методику Фарнелла-Джонса [1] для расчета скорости ПАВ с применением процедуры поиска глобального экстремума функции цели (функции эффективной диэлектрической проницаемости или функции определителя граничных условий) в работе были рассчитаны комплексные корни $\beta_{1,2}$ характеристического уравнения [1] для данной ориентации кварца, которые представляют собой две чисто комплексно-сопряженных пары. При поиске ПАВ решения необходимо выбрать корни, имеющую отрицательную мнимую часть, для того чтобы парциальные волны затухали вглубь поверхности кристалла ($\beta_1=(0.0307-j \times 1.01$, $\beta_2=0.23-j \times 0.014)$). В результате была определена фазовая скорость волны $V_{SH}=4993$ м/с, величина которой близка к V_{t2} . Таким образом, можно сделать вывод о существовании чисто поверхностной волны SH-типа, имеющей фазовую скорость, как у волны вытекающего типа (ППАВ). Четыре корня характеристического уравнения для этой ориентации образуют две комплексно-сопряженные пары с явно ненулевыми мнимыми частями, что характерно только для волн Г-Б и не может быть отнесено к псевдоповерхностным и скользящим объемным волнам. Эта волна действительно имеет все свойства волны Г-Б, кроме скорости. Вероятно, речь идет о некоторой новой разновидности таких волн, не описанной ранее в литературе.

- [1] Мэттьюз Г. Фильтры на поверхностных акустических волнах. - М.: Радио и связь, 1981. 470 С.
- [2] Kadota M., Yoneda T., Fujimoto K. //IEEE Trans. on Ultrason., Ferroelectr., and Freq. Contr. 2004. Vol. 51, No.2. P. 202.

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ НЕПРЕРЫВНОГО 84 ГГц ГИРОТРОНА

П.К. Гаврилов

Нижегородский госуниверситет

Е.А. Солуянова и группа сотрудников ЗАО НПП «Гиком»

ЗАО НПП «Гиком»

Потребности имеющихся в мире установок термоядерного синтеза, в частности ITER, диктуют необходимость разработки мощных гиротронов непрерывного действия.

При создании гиротрона с частотой генерации 84 ГГц и выходной мощностью 200 кВт помимо отработанных расчетных, конструкторских и технологических решений применялись принципиально новые приемы, направленные на достижение стабильной работы прибора в условиях существования большого количества мало изученных дестабилизирующих факторов. В этой связи результаты экспериментальных исследований гиротрона представляют интерес не только с точки зрения изучения его потребительских свойств, но и с точки зрения развития теории.

Ниже показаны характеристики гиротрона с рабочим типом волны Н12.5, выводом СВЧ-мощности в виде пучка волн с Гауссовым распределением амплитуды, током электронного пучка не более 10 А, ускоряющим напряжением ~ 68 кВ и рекуперацией остаточной энергии электронов. Габариты и общий вид прибора изображены на рис.1, фотография в испытательном стенде – на рис.2.

На рис.3 приведены зависимости выходной мощности и КПД гиротрона от тока электронного пучка. Номинальная мощность $P=200$ кВт получена на токе $I=9$ А, оптимальный режим с КПД $\eta=55\%$ достигается на $I=10$ А.

Набор осциллограмм работы гиротрона в течении 1000 секунд на рис.4 (сверху – вниз: ток электронного пучка, рекуперационное напряжение, ток рекуперационного источника питания, ускоряющее напряжение, СВЧ-мощность, ток встроенного вакуумного насоса) подтверждает стабилизацию режима, которая наступает после 4 минут генерации, при этом ток катода растет не более, чем на 5% от стартового.

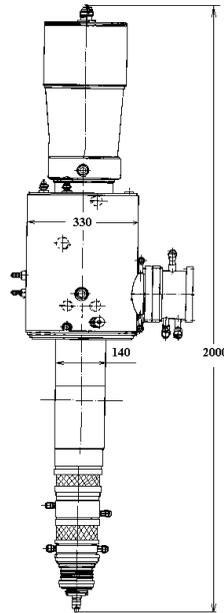


Рис.1

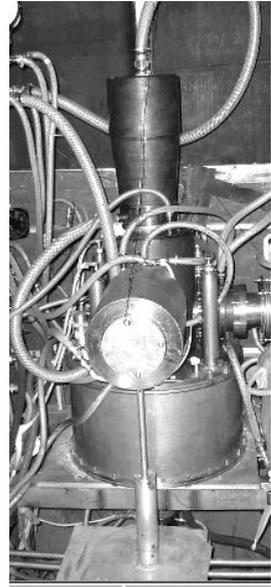


Рис.2

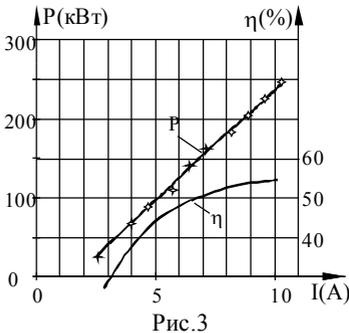


Рис.3

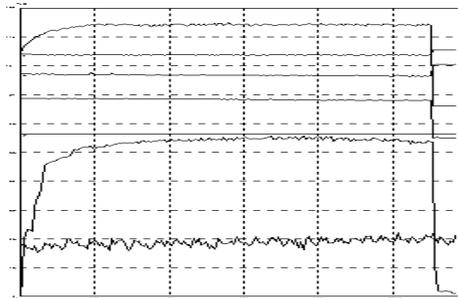


Рис.4

Исследовалась также зависимость мощности и КПД гиротрона от рекуперационного напряжения при фиксированном напряжении и токе пучка (см.рис.5) и модуляционная характеристика прибора при условии модуляции мощности рекуперационным напряжением (см. рис.6).

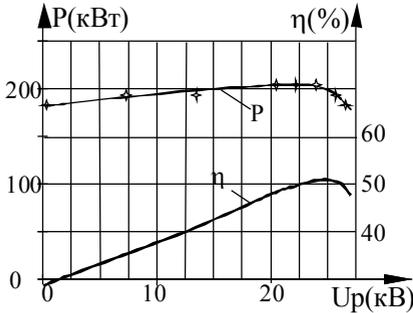


Рис.5

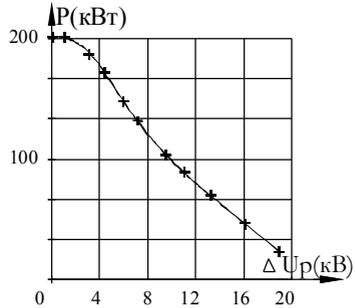


Рис.6

Практический интерес представляет изменение частоты от длительности генерации (рис.7), указывающее на достижение стабилизации в электродинамической системе гиротрона в течение ~ 2 с. В результате описанных экспериментальных исследований были подтверждены теоретические расчеты и намечены пути повышения непрерывной СВЧ-мощности за счет повышения эффективности преобразования рабочей моды в выходной Гауссов пучок волн.

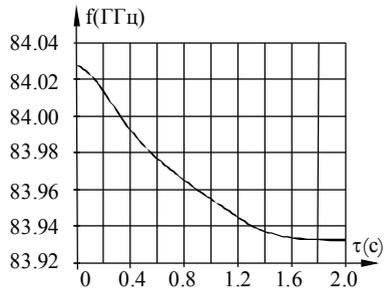


Рис.7

ФИЗИКО-ТОПОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДЕФЕКТООБРАЗОВАНИЯ И ТРАНСПОРТА НОСИТЕЛЕЙ ЗАРЯДА В КВАЗИБАЛЛИСТИЧЕСКИХ ПОЛЕВЫХ ТРАНЗИСТОРАХ

Е.В. Киселева, С.В. Оболенский

Нижегородский госуниверситет

Известно, что при воздействии быстрых нейтронов в результате каскадных смещений атомов в полупроводниках формируются кластеры радиационных дефектов (КРД) [1], образованные первичными атомами материала. Каждый кластер состоит из одного или нескольких субкластеров (СКРД), представляющих собой более мелкие и плотные группы дефектов, образованные при движении в материале вторичных атомов [2].

СКРД и КРД в целом окружены пространственным зарядом и являются непрозрачными, соответственно, для горячих и холодных электронов [2]. В таких

условиях уменьшение размеров полупроводниковых структур, в соответствии с тенденциями современной нанoeлектроники, может привести к появлению новых эффектов радиационного воздействия, связанных с тем, что некоторые размеры рабочих областей приборов становятся сравнимы с расстояниями между КРД (или СКРД), а также с размерами самих кластеров. Кроме того, в случае современных приборов (в том числе, квазибаллистических), где транспорт носителей осуществляется в приповерхностных областях, существенным становится влияние эффекта усиления флюенса носителей заряда вблизи границ раздела различных материалов. Таким образом, топология КРД должна учитываться при моделировании транспорта носителей заряда в современных нанометровых приборах.

Для анализа топологии КРД в гетероструктуре ПТШ предложен комплексный метод, включающий моделирование методом Монте-Карло на основе модели [3] процесса дефектообразования в приборной структуре и исследование пространственного распределения дефектов в составе каскадов смещения атомов. Метод позволяет получить информацию о структуре разупорядоченной области (характерные размеры скоплений, их взаимное расположение и расстояния между ними). На основе полученных данных проводится двумерное физико-топологическое моделирование в приближении времен релаксации транспорта носителей заряда в гетероструктуре ПТШ при высоких флюенсах нейтронного облучения (когда на длине канала укладывается больше одного КРД). При этом времена релаксации определяются методом частиц на основе процедуры Монте-Карло с учетом рассеяния на заряженных точечных радиационных дефектах и на субкластерах дефектов. В отличие от [4] сечение рассеяния на СКРД определяется с учетом разброса субкластеров по размерам. В случае малых флюенсов нейтронного облучения (когда расстояние между КРД превышает расстояния между СКРД) инжекция носителей заряда происходит в основном в область ненарушенного материала. Скорость радиационной модификации параметров при этом предлагается оценивать по росту площади неинжектирующих областей при увеличении флюенса нейтронного облучения. В предельном случае приборов нанoeлектроники, когда размеры активной области будут меньше размеров СКРД по трем координатам, вероятность выхода прибора из строя будет определяться вероятностью прямого попадания субкластера в канал, т.е. вероятностью его разрушения.

- [1] Аствацатурьян Е.Р., Громов Д.В., Ломако В.М. Радиационные эффекты в приборах и интегральных схемах на арсениде галлия. – Минск: Университетское, 1992.
- [2] Киселева Е.В., Оболенский С.В. Микроскопия кластеров радиационных дефектов с помощью горячих электронов в баллистических полевых транзисторах //ВАНТ. Серия: физика радиационного воздействия на радиоэлектронную аппаратуру. 2004. вып. 1-2. С. 46-48.
- [3] Biersak J.P. Computer simulation of sputtering // Nuclear instruments and methods in physic research. 1987. № 1. P. 21-36.
- [4] Оболенский С.В. Предел применимости локально-полевого и квазигидродинамического приближения при расчетно-экспериментальной оценке радиацион-

ной стойкости субмикронных полупроводниковых приборов// Изв. вузов: Электроника. 2002. № 6. С. 31-38.

ВЫСОКОСЕЛЕКТИВНЫЙ БРЭГГОВСКИЙ ОТРАЖАТЕЛЬ, ОСНОВАННЫЙ НА СВЯЗИ РАСПРОСТРАНЯЮЩИХСЯ И КВАЗИКРИТИЧЕСКОЙ МОД

В.Ю.Заславский, В.Н.Мануилов,

Нижегородский госуниверситет

Н.С.Гинзбург, А.М. Малкин, Н.Ю.Песков, А.С.Сергеев

Институт прикладной физики РАН

В лазерах на свободных электронах достаточно широкое распространение получили отражатели в виде участков слабогофрированных волноводов, в которых, в условиях брэгговского резонанса, осуществляется связь и взаимное рассеяние двух встречно распространяющихся волн. Традиционно по аналогии с оптическими системами предполагалось, что обе волны обладают значительной групповой скоростью. При этом электронный поток как активная среда вследствие эффекта Доплера может синхронно взаимодействовать и усиливать только одну попутную волну, а встречная волна осуществляет обратную связь. В данной работе рассмотрен специфический, представляющий, прежде всего интерес для микроволнового диапазона случай, когда волна обратной связи является квазикритической модой. Брэгговские зеркала, в которых падающая волна рассеивается в квазикритическую моду, а последняя в свою очередь переизлучается в отраженную волну с поперечной структурой идентичной падающей волне, позволяют получить эффективное отражение при значительно меньших (по сравнению с традиционным случаем) коэффициентах связи волн. Соответственно при большой сверхразмерности появляется возможность обеспечения селективного отражения падающей рабочей волны, когда переизлучение в паразитные моды достаточно мало. Таким образом, рассматриваемые зеркала должны позволить существенно продвинуться в решении проблемы селекции мод по поперечному индексу.

Рассмотрим осесимметричный брэгговский рефлектор, на боковые стенки которого нанесена неглубокая гофрировка: $r = r_0 + r_1 \cos(\bar{h}z)$, где r_0 - средний радиус волновода, $\bar{h} = 2\pi/d$, d и r_1 - период и глубина гофрировки соответственно. Структуру падающей и рассеянной волн будем искать в виде:

$$\vec{E} = \text{Re} \left(A_+(z) \vec{E}_A(r_\perp) e^{i(\omega t - \bar{h}z)} \right) + \text{Re} \left(A_-(z) \vec{E}_A(r_\perp) e^{i(\omega t + \bar{h}z)} \right), \quad (1)$$

где A_+ , A_- - амплитуды прямой и обратной волн, с совпадающей поперечной структурой $\vec{E}_A(r_\perp)$. Поле квазикритической моды может быть представлено в виде:

$$E = \text{Re} \left(B(z) E_B(r_\perp) e^{i\omega t} \right), \quad (2)$$

где B - медленная амплитуда. При выполнении условия брэгговского резонанса $h \approx \bar{h}$ взаимное рассеяние двух встречно распространяющихся волн через возбуждение квазикритической моды описываются в случае монохроматических сигналов системой уравнений:

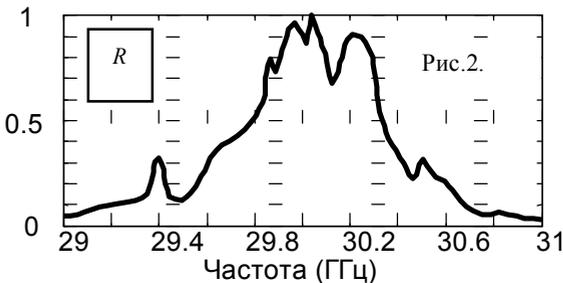
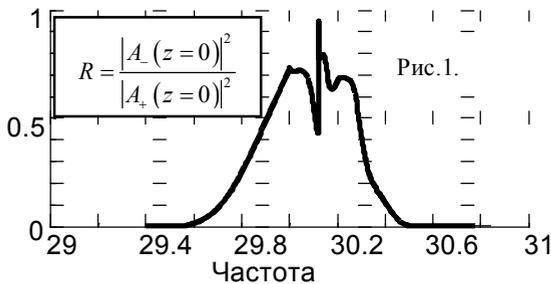
$$\begin{aligned} \frac{dA_{\pm}}{dZ} \mp i\Omega A_{\pm} &= \pm i\alpha B e^{\pm isZ}, \\ \frac{1}{2} \frac{d^2 B}{dZ^2} + i\Omega B &= \alpha (A_+ e^{-isZ} + A_- e^{isZ}) \end{aligned} \quad (3)$$

с граничными условиями:

$$A_+ \Big|_{z=-l/2} = A_0, \quad A_- \Big|_{z=l/2} = 0, \quad \frac{dB}{dZ} \mp i\sqrt{2}\Omega B \Big|_{z=\pm l/2} = 0,$$

где $Z = \omega_c z / c$, α - безразмерный коэффициент связи на брэгговской структуре, пропорциональный глубине гофра, $s = (\bar{\omega} - \omega_c) / \omega_c$ - параметр расстройки между частотой отсечки квазикритической моды ω_c и брэгговской частотой $\bar{\omega} = \bar{h}c$, $\Omega = (\omega - \omega_c) / \omega_c$ - отстройка частоты падающего излучения от частоты отсечки.

Уравнения (3) моделировались при параметрах брэгговской структуры близких к использованным в экспериментальных тестированиях. Длина составляла $l=20$ см, глубина гофра 0.3 мм, период 10.7 мм. Для мод H_{11} и H_{12} расчетный коэффициент связи $\alpha \approx 6,4 \times 10^{-3}$. На Рис. 1 показана зависимость коэффициента



отражения от частоты соответствующая полосе 400 МГц. Результаты расчетов согласуются с результатами эксперимента, представленными на Рис. 2. Таким образом, результаты теоретического анализа и экспериментальных тестов демонстрируют возможность реализации узкополосного рефлектора на основе связи распространяющихся и квазикритических мод на неглубокой гофрированной поверхности.

Моделирование в рамках трехмерного кода подтверждает указанный факт и показывает, что переизлучение в паразитные моды не превосходит по мощности 5%.