

ОЦЕНКА РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ СИСТЕМЫ КВАНТОВОЙ КРИПТОГРАФИИ

И.Ю. Забавичев, С.В. Оболенский

Нижегородский госуниверситет

Системы квантовой криптографии обладают целым рядом полезных качеств, основным из которых является повышенная устойчивость к «взлому». В случае их использования в спецтехнике к ним будут предъявлены жесткие эксплуатационные требования, например, радиационная стойкость.

Общий уровень устойчивости системы квантовой криптографии к радиационному облучению определяется ее компонентами: излучающим элементом, выполненным в виде полупроводникового лазера или источника единичных фотонов, и детектором, представляющим собой лавинный фотодиод. В работе были рассмотрены основные физические процессы, связанные с радиационным воздействием, и проведен сравнительный анализ указанных приборов, реализованных по различным технологиям. Рассматривалось использование в конструкции светоизлучающих и фотоприемных диодов гомо- и гетеропереходов, а также квантовых точек.

Анализ показал, что наибольшее влияние на работу полупроводниковых приборов оказывают ионизация и дефектообразование – возникновение кластеров радиационных дефектов при нейтронном облучении [1]. Разогрев при облучении не оказывает существенного влияния на качество работы полупроводниковых диодов, т.к. кластер имеет малые пространственные масштабы ~ 10 нм, а интегральный нагрев полупроводниковой структуры невелик. Ионизация может привести к нарушению однофотонного характера излучения у источника единичных фотонов и увеличению вероятности ложного срабатывания фотодетектора на весь период облучения. Возникновение радиационных дефектов приводит к увеличению вероятности безызлучательной рекомбинации и увеличению вероятности ложного срабатывания фотодетектора. Преимущество приборов с квантовыми точками заключается в том, что из-за локализации электронно-дырочных пар в квантовых точках рекомбинация на дефектах возможна лишь в тех случаях, когда дефект расположен в самой точке, но вероятность поражения указанной точки очень мала.

- [1] Вавилов В.С., Ухин Н.А. Радиационные эффекты в полупроводниках и полупроводниковых приборах. – М.: Атомиздат, 1969, 312 с.

ОЦЕНКА РАДИАЦИОННОЙ СТОЙКОСТИ КВАНТОВОГО КОМПЬЮТЕРА

А.А. Потехин, С.В. Оболенский

Нижегородский госуниверситет

Одним из важнейших применений квантового компьютера является решение задач криптоанализа систем шифрования с открытым ключом [1]. Для применения данного устройства в специализированных системах необходимым условием является высокий уровень радиационной стойкости.

В работе была построена модель нейтронного поражения блока, выполняющего унитарные преобразования в квантовом компьютере. Рассматривались кубиты на паре асимметричных Si-Ge квантовых точек. Для построения модели использовалась информация о спектрах фотолюминесценции квантовых островков германия в структуре кремния [2] до и после нейтронного облучения. На основании данных спектров были сделаны предположения об изменении параметров квантовых точек при радиационном облучении и построена соответствующая математическая модель. Учитывалось изменение размеров квантовой точки, принимался во внимание «выброс» электрона из квантовой точки при ее разогреве, учитывалась ионизация полупроводника при радиационном воздействии.

Были проведены расчеты времени потери работоспособности (ВПР) и уровня бессбойной работы (УБР), т.е. порогового уровня радиационного воздействия, при котором прибор еще будет сохранять работоспособность. Результаты расчетов показывают, что квантовый компьютер имеет низкий УБР – теряет информацию при уровнях облучения значительно ниже по сравнению с обычным компьютером. Однако уровень катастрофического отказа, т.е. такой уровень облучения, после которого работоспособность квантового компьютера не восстанавливается, может быть значительно больше, чем у обычных компьютеров. Последнее обусловлено использованием квантовых точек в качестве активной области квантовых кубитов.

[1] Muller A., Herzog T., Tittel W., Zbinden H., Gisin N.// Appl. Phys. Lett. 1997. V.70. P.793.

[2] Красильник З.Ф., Кудрявцев К.Е., Качемцев А.Н., Лобанов Д.Н., Новиков А.В., Оболенский С.В., Шенгуров Д.В.// ФТП. 2011. Т.45, вып. 2. С.230.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ В GAN ТРАНЗИСТОРАХ С ДВУМЕРНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ГАЗОМ ПРИ РАДИАЦИОННОМ ОБЛУЧЕНИИ

Е.А. Тарасова, А.Ю. Чурин, С.В. Оболенский

Нижегородский госуниверситет

Исследована радиационная стойкость GaN полевых транзисторов с двумерным электронным газом (НЕМТ). Транзисторы являются перспективными для использования в СВЧ-усилителях общего и специального назначения: высокие значения концентрации электронов в канале в сочетании со значительными пробивными

напряжениями позволяют обеспечить рекордную выходную мощность в СВЧ диапазоне частот, что важно для практики.

В работе исследовали HEMT на основе гетероструктуры AlGaIn/GaN. Для моделирования использовалась квазигидродинамическая модель, представленная в [1]. Параметры зонной структуры, профили концентрации и подвижности электронов в канале транзистора были взяты из [2]. Скорости радиационно-стимулированного изменения подвижности, коэффициента диффузии, скорости насыщения, времен релаксации энергии и импульса электронов определялись методом Монте-Карло, как это было предложено авторами ранее в [3].

Проводился расчет сток-затворных вольтамперных характеристик полевых транзисторов как в момент, так и после радиационного воздействия в лабораторных условиях. Кроме этого, проводился расчет вольтафарадной характеристики и анализировалась ее связь с профилями концентрации электронов, определяемыми пьезоэлектрическими полями в структуре транзистора.

В результате расчетов получено: 1) сдвиг порогового напряжения обусловлен положительным зарядом, захваченным на ловушках в барьерном слое; 2) практически значимые изменения характеристик транзистора при облучении нейтронами до уровня $3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ не выявлены; 3) расчетный уровень отказа составляет величину $\approx 2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$. Полученные данные коррелируют с результатами работы [4].

Результаты работы актуальны для разработчиков специальной аппаратуры, а также могут использоваться при анализе физических процессов, возникающих в радиационных технологических операциях.

- [1] Тарасова Е.А., Демидова Д.С., Оболенский С.В., Фефелов А.Г., Дюков Д.И. // ФТП. 2012. Т. 46, № 12. С. 1587.
- [2] Федоров Ю. // Электроника. Наука. Бизнес. 2011, № 2. С. 92.
- [3] Демарина Н.В., Оболенский С.В. // ЖТФ. 2002. Т. 72, № 1. С. 66.
- [4] Басаргина Н.В., Ворожцова И.В., Дубровских С.М., Ткачев В., Шукайло В.П. // Труды Всероссийской конф. «Стойкость – 2012». 2012. С. 153.

ВЛИЯНИЕ НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ТЕРАГЕРЦОВЫЙ ДИОД ШОТКИ

**Е.В. Волкова, Е.А. Тарасова, Д.С. Демидова, Е.С. Оболенская, А.Ю. Чурин,
С.В. Оболенский, А.В. Ключев, Е.И. Шмелев, А.В. Якимов**

Нижегородский госуниверситет

В терагерцевых диодах Шоттки времена пролета носителей заряда между анодом и катодом составляют величину $\sim 10^{-13}$ с, что меньше характерного времени формирования кластера радиационных дефектов, возникающего при облучении нейтронами с энергией ~ 1 МэВ [1, 2]. Размеры активных областей диодов составляют несколько десятков нанометров, что сравнимо с размерами кластеров радиационных дефектов. Особенности функционирования таких приборов в условиях

нейтронного облучения экспериментально изучены недостаточно, что не позволяет точно предсказывать их радиационную стойкость.

Проводились измерения вольтамперных и вольтфарадных характеристик и $1/f$ шумов диодов Шоттки с характерным временем переключения менее 10^{-13} с. Указанное время определялось как произведение барьерной емкости ($7 \dots 10$ фФ) на сопротивление базы диода ($5 \dots 10$ Ом). Исследовались диоды до и после нейтронного облучения с характерным флюенсом $\sim 10^{14}$ см $^{-2}$.

Кроме того, проводились расчеты динамической картины развития и стабилизации каскада смещения атомов с учетом его способности к рассеянию потока квазибаллистических электронов, формирующегося в современных приборах терагерцовой наноэлектроники. Процедура проведения расчетов была итерационной с промежуточной уточняющей калибровкой на основе экспериментальных данных, полученных на первом и втором этапах работы. Для моделирования использовалась модель транспорта электронов на основе метода Монте-Карло, предложенная в [3].

Показано, что радиационная стойкость нанодиодов Шоттки имеет близкую к предельной величину, что позволяет рекомендовать их для использования в специальных электронных устройствах. Проведение дальнейших экспериментов позволит существенно продвинуться в понимании фемтосекундной физики процессов транспорта электронов в терагерцевых диодах в момент формирования кластера радиационных дефектов.

Работа поддержана грантом Минобрнауки. Авторы благодарят Ю.И. Чеченина за предоставленные образцы диодов.

- [1] Вавилов В. С., Ухин Н. А. Радиационные эффекты в полупроводниках и полупроводниковых приборах. – М.: Атомиздат, 1969. С. 311.
- [2] Винецкий В.Л., Холодарь Г.А. Радиационная физика полупроводников. – Киев: Наукова думка, 1979. С. 332.
- [3] Obolensky S.V., Murel A.V., Vostokov N.V., Shashkin V.I. //IEEE Trans. on Electron Devices. 2011. V.58, No.8. P. 2507.

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ГИРОТРОНА ДЛЯ РАБОТЫ НА НИЗКИХ НАПРЯЖЕНИЯХ НА РАЗЛИЧНЫХ ГАРМОНИКАХ ГИРОЧАСТОТЫ

**М.Ю. Глявин¹, Н.А. Завольский¹, В.Е. Запевалов¹, Г.С. Нусинович²,
А.С. Седов¹**

¹*Институт прикладной физики РАН*

²*University of Maryland, USA*

Долгое время основным направлением модернизации гиротронов было достижение высоких уровней мощностей и КПД. Главным образом это было связано с решением задач по нагреву плазмы в установках по управляемому термоядерному синтезу (УТС) и технологических приложений.

Однако в последнее время круг научных и технических приложений гиротронов существенно расширился. Они используются для исследования нелинейной динамической поляризации ядер и молекул, диагностики плотной плазмы в установках УТС, изучения свойств и создания новых материалов, обнаружения радиоактивных источников и т.д. [1–3].

Данные гиротроны работают на сравнительно малых ускоряющих напряжениях 10–20 кВ и токах электронного пучка до 1 А. В силу дороговизны и сложности создания сильных магнитных полей большинство таких гиротронов работают на гармониках циклотронной частоты. При этом оптимизация их электродинамических систем отличается тем, что в условиях малых напряжений и ограничения тока пучка нельзя достичь максимального уровня КПД, а на процесс оптимизации накладываются дополнительные ограничения, связанные со значительной долей омических потерь в резонаторе (особенно для гиротронов терагерцового диапазона).

Полученные в работе результаты аналитических оценок и численных расчетов, могут быть использованы для проектирования и оптимизации мало-мощных низкочастотных гиротронов, работающих на первых трех гармониках циклотронной частоты.

- [1] Bykov Yu, Ereemeev A., Glyavin M., et al. // IEEE Trans. on Plasma Science. 2004. V.32, No.1. P. 67.
- [2] Idehara T., Mitsudo S., Ui M., Ogawa I., Sato M., Kawahata K. // J. Plasma Fusion Res. Series. 2000. V.3. P.407.
- [3] Hornstein M.K., Bajaj V.S., Griffin R.G., Temkin R.J. // IEEE Trans. On Plasma Science. 2007. V.35 (1). P. 27.

ПРОЕКТ НЕПРЕРЫВНОГО ГБО С ЧАСТОТОЙ 1ТГц

Д.В. Клубков¹⁾, В.Н. Мануилов^{1,2)}, Ю.К. Калынов²⁾, А.В. Савилов²⁾

¹⁾Нижегородский госуниверситет

²⁾Институт прикладной физики РАН

Максимальная частота излучения гиротронов достигла 1–1.3 THz. Тем не менее терагерцовые гиротроны не получили широкого распространения в связи с очень сильным магнитным полем, необходимым для работы на основной и второй гармониках циклотронной частоты. Магнитное поле может быть значительно уменьшено за счет использования более высоких гармоник, что возможно при использовании гиротронов с большой орбитой. Такая система, работающая на третьей гармонике, уже была реализована и испытана при ускоряющем напряжении 80 кВ. В ней стабильная генерация наблюдается на модах TE36 и TE37 и соответствующих им частотах 0,87 и 1,00 ТГц. Однако КПД гиротрона составляет всего 1%, хотя численное моделирование предсказывало довольно высокий КПД, порядка 10%. Причиной таких различий яв-

ляются большие омические потери, вследствие которых около 85% мощности расходуется на нагрев стенок резонатора [1].

Одним из путей решения данной проблемы может служить схема гиротрона со связанными резонаторами. Она основывается на использовании секционированной системы с клистронным характером электронно-волнового взаимодействия: частицы взаимодействуют с волной только во входной (секция 1) и выходной (секция 2) секциях, в то время как расположенная между ними область дрейфа обеспечивает связь между этими секциями и выполняет группировку электронов. Очевидно, что дифракционная и омическая добротность определяется суммарной длиной секций 1 и 2, а стартовый ток системы определяется общей длиной [2]. В докладе теоретически и экспериментально рассмотрен гиротрон на 3 гармонике на моде $TE_{3,5}$ на частоте 0,87 THz.

В результате проведенного эксперимента удалось получить генерацию на указанной частоте. Теоретически рассчитанный КПД хорошо совпадает с экспериментальными данными.

- [1] Цимринг Ш.Е. Мазеры на циклотронном резонансе. Учеб. пособие. – Горький: Изд-во ГГУ, 1988, 21 с.
- [2] Savilov A.V. // Appl. Phys. Lett. 2009. V.95. P. 073503.