

**Новый метод модификации материала с помощью
электродинамической локализации оптического излучения**

С.В.Оболенский¹

*Нижегородский государственный университет им. Н.И.Лобачевского
проспект Гагарина 23, Нижний Новгород 603950, Россия*

В.А.Козлов

*Институт физики микроструктур РАН,
Нижний Новгород 603600, Россия*

М.А.Китаев

*Научно-исследовательский институт «САЛЮТ»,
Нижний Новгород 603600, Россия*

В.К.Киселев

*Научно-исследовательский институт измерительных систем,
Нижний Новгород 603600, Россия*

Предложен метод электродинамической локализации оптического излучения с помощью заостренных металлических объектов, позволяющий модифицировать материалы на размерах, существенно меньших длины волны излучения.

1. Введение

Традиционный путь уменьшения размеров элементов (например, в электронике) вплоть до нанометров, основанный на использовании обычных оптических принципов, требует соответствующего уменьшения длины волны излучения так, чтобы она оставалась меньше размеров модифицируемого объекта. Для нанометровых объектов такой подход означает переход к рентгеновским длинам волн, что сопряжено с большими техническими трудностями и затратами. С другой стороны, всем известно, что использование электромагнитного излучения на низких частотах (например, 50 Гц) почти всегда происходит в областях много меньших длины волны. При этом для описания происходящих здесь процессов используются не оптические принципы, а классический электродинамический подход. Для локализации мощности применяются протяженные металлические объекты, один из размеров которых меньше длины волны (например, провод, экран и т.д.). Установленное Максвеллом единство природы электромагнитного и оптического излучения позволяет надеяться на то, что электродинамические принципы локализации переменного поля могут быть успешно применены и в оптическом диапазоне.

В настоящей работе предлагается использовать электродинамический способ локализации оптического излучения в областях, существенно меньших длины волны, аналогичный тому, который реализуется с помощью антенн. Применение по-

¹ Тел.: +7-8312-656032; Fax: +7-8312-656416; E-mail: obolensk@rf.unn.ru

добного подхода в настоящей работе позволило модифицировать свойства вещества в нанометровых областях с помощью лазерного излучения, с длиной волны, существенно превышающей размеры модифицируемой области, что весьма актуально при изготовлении полупроводниковых приборов нанoeлектроники.

2. Описание электродинамического метода локализации оптического излучения

В качестве металлического объекта, локализирующего оптическое излучение, был использован затвор GaAs полевого транзистора (ПТ) на основе структуры металл-полупроводник. Энергия квантов излучения неодимового лазера имела величину около 1,3 эВ, т.е. была меньше ширины запрещенной зоны GaAs, что давало возможность облучать образцы не только с лицевой стороны, на которой были изготовлены приборы, но и с обратной стороны, т.е. через подложку. Размеры затвора были подобраны таким образом, что по одной координате они существенно превосходили длину волны излучения, по другой были сравнимы, а по третьей координате в этом объекте имелись области с характерными размерами, существенно меньшими длины волны. Сечение затвора имело ромбическую форму, при этом нижний угол ромба имел радиус закругления 15 нм (рис.1). Такая форма позволяла с помощью изменения направления падения и поляризации излучения управлять степенью локализации излучения в области, примыкающей к клинообразному острию затвора, за счет изменения структуры поля.

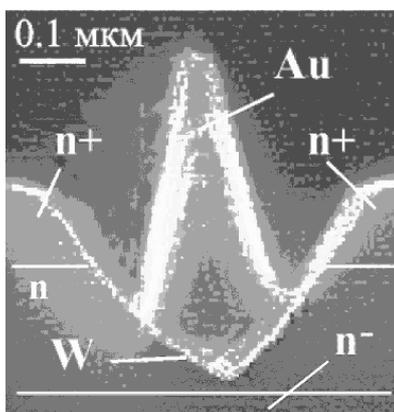


Рис.1

Микрофотоснимок поперечного сечения V-образного затвора ПТШ. Микрофотоснимок получен с помощью растрового электронного микроскопа JEOL.

Оптическое поле в материале под затвором в случае, когда падение излучения происходит снизу, можно представить в виде суммы полей, создаваемых падающим и отраженным гранями клина излучением, а также полем, которое имеет характер цилиндрической волны, как бы излучаемой ребром клина. Сложение полей рассеянного и падающего излучения вблизи ребра клина приводит к увеличению компоненты поля, перпендикулярной к металлической поверхности на размерах, определяемых формой острия, а не длиной волны. Поскольку поглощаемая материалом мощность лазерного излучения пропорциональна квадрату напряженности поля, то область воздействия на материал будет еще более локальной.

Модификация материала при локальном выделении мощности происходит в условиях превышения некоторого порога, определяемого свойствами материала при квазиadiaбатически быстром выделении энергии, при котором потери тепла на растекание за счет теплопроводности малы. Первое условие определяет мощность источника излучения, а второе накладывает ограничения на длительность лазерного импульса. Чем меньше модифицируемый объем, тем ограничения более жесткие, поскольку уменьшение размеров ведет к увеличению отношения площади поверхности к объему.

3. Теоретические оценки

В качестве модели объекта, локализирующего излучение, рассматривались две модели: клин, образованный нижней поверхностью затвора (рис.1), и сильно вытянутый эллипсоид, грубо аппроксимирующий форму затвора. При дифракции на клине поле лазерного излучения можно представить в следующем виде [1]:

$$V(r, \psi) = \frac{1}{2\gamma} \int_C e^{-ikr \cos \xi} \frac{d\xi}{1 - e^{-i\pi(\xi + \psi)/\gamma}}.$$

Путь интегрирования C в плоскости ξ состоит из двух петель, концы которых уходят на бесконечность, r и ψ – радиальная и азимутальная координаты. Ток в источнике, создающем цилиндрическую волну, пропорционален $r^{-1/2}$, т.е. имеет особенность при $r \rightarrow 0$, где r – расстояние до ребра клина [2,3]. Для закругленного клина естественно взять в качестве r радиус закругления.

Описывая форму затвора вытянутым эллипсоидом, можно воспользоваться классическим решением Абрагама [4]. Это решение позволяет учесть резонансные свойства объекта, локализирующего излучение, определяемые его геометрическими размерами.

Выше предполагалось, что металл идеальный, проникновение излучения внутрь него не происходит, однако при рассматриваемых размерах, порядка сотен нанометров, скин-слой имеет сопоставимую величину. Тем не менее, резкая граница раздела между металлом затвора и полупроводником обеспечивает резкий перепад диэлектрических проницаемостей. При этом размеры области локального увеличения поля остаются прежними, хотя величина поля в особой точке уменьшится.

Толщина скин-слоя описывается формулой [5]:

$$\delta = \frac{c}{\sqrt{2\pi\sigma\omega}},$$

где c – скорость света, σ – проводимость золота, μ – магнитная проницаемость золота, ω – частота. Оценки показывают, что толщина скин-слоя в Au составляет величину порядка 24 нм, что соответствует экспериментальным данным [6].

Предполагалось, что выделение тепла происходит во время лазерного импульса локально вдоль оси цилиндра, соответствующего ребру клина, в области, диаметром 15 нм, что сопоставимо с радиусом закругления клина. Характерные размеры области локализации поля, требуемые для модификации длительности импульса, находились из решения уравнения теплопроводности в цилиндрических координатах с осью цилиндра вдоль ребра клина. Разность коэффициентов теплопроводности затвора и полупроводника учитывалась путем введения весовых коэффициентов, определяемых из угла раскрытия клина. Эта упрощенная оценка завышает размер области локального выделения энергии.

Если предположить, что модификация материала происходит при превышении некоторого порога, определяемого температурой образования дефектов, то при определенных мощностях и длительностях импульса излучения возможна модификация материала на размерах порядка десятков нанометров. Расчеты показывают, что при пороговом значении температуры образования дефектов, равным 500°С, модификация происходит в области, с размерами порядка 60 нм. На рис.2 приведена зависимость температуры модифицируемой области от времени для слоев, расположенных на различной глубине под острием затвора. В случае мгновенного выделения энергии на металлической поверхности клина, время, в течение которого температура превышает выбранный порог модификации, имеет величину порядка 300 пс.

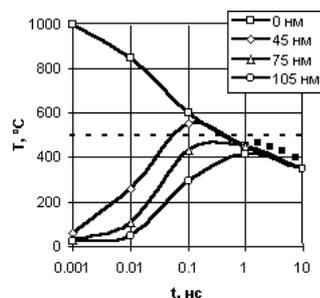


Рис.2
Зависимость температуры модифицируемой области от времени. Пунктиром показан порог модификации материала. Черные квадраты – эксперимент.

4. Описание эксперимента

Для исследовательских целей были изготовлены полевые транзисторы на основе GaAs, с длиной затвора 10, 1, 0,5, и 0,25 мкм, последний имел V-образную [7] форму (рис.1). Толщина металлизации затвора – 0,4 мкм. Толщина подложки составляла для всех образцов 100 мкм. Расстояние между затвором и стоком (источком) варьировалась от 1,5 до 3 мкм. Латеральные размеры металлизации стока и истока составляли 40 мкм.

В качестве источника излучения использовался неодимовый лазер с энергией излучения 0,05 Дж за импульс в пятне, диаметром 4 мм и длительностью импульса 10 нс (одиночный импульс). Неоднородность интенсивности излучения в пятне – 200%. Образцы облучались лазерными импульсами с контролем статических вольт-амперных (ВАХ) и вольт-фарадных (ВФХ) характеристик и динамических параметров транзисторов (коэффициенты усиления и шума) как после каждого облучения, так и только после определенного числа импульсов. Размещение образцов в пятне в ряде случаев не изменялось, а в других экспериментах варьировалось по площади пятна.

5. Результаты эксперимента

5.1. Транзисторы с длиной затвора больше и порядка длины волны излучения

Изучение действия лазерного облучения на ПТ с длиной затвора от 10 до 0,5 мкм при облучении структуры с лицевой и обратной стороны показало, что деградация характеристик подобна друг другу. Это объясняется малым коэффициентом поглощения излучения в GaAs и плавной структурой оптического поля, которое меняется на масштабах, сравнимых с длиной волны. Изменение характеристик связано с термостимулированной диффузией атомов на расстояния, сравнимые с толщиной канала ПТ, а также с захватом носителей заряда на термогенерированные ловушки, возникшие при лазерном облучении. Зависимость скорости изменения характеристик транзисторов от мощности излучения имеет пороговый характер. При уменьшении мощности излучения до 5 мДж за импульс, характеристики ПТ в пределах точности измерений не изменяются.

Решение уравнения теплопроводности выявило наличие двух характерных временных интервалов, связанных с распространением полученного тепла. За время длительности импульса (10 нс) металлические контакты разогреваются до температур, порядка 800–1000⁰С, затем образец остывает до 100⁰С за времена, порядка 1 мкс. При этом роль резервуара для сброса тепла играет кристалл полупроводника, а, следовательно, неважно, какой тепловой контакт имеется между кристаллом и теплоотводом.

Известным приемом улучшения теплоотвода является смачивание поверхностей кристалла и массивного основания, на котором расположен кристалл, глицерином, который обладает достаточными изолирующими свойствами и не ухудшает работы транзистора. Как показывают эксперименты, в случае использования глице-

рина в качестве теплопроводящего вещества, осуществляющего теплоотвод от противоположной облучаемой поверхности образцов, облучаемая сторона разогревается и остывает аналогично теплоизолированным образцам. В случае, когда отвод тепла осуществлялся от стороны пластины, на которой были размещены транзисторы, а облучение проводилось с подложечной стороны, изменения параметров прибора отсутствовали, что объясняется быстрым отводом тепла через тонкий слой металлизации контактов ПТ.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что для длинноканальных транзисторов лазерное излучение воздействует на всю структуру целиком.

5.2. Транзисторы с эффективной длиной затвора меньше длины волны

В отличие от длинноканальных ПТ лазерное облучение короткоканальных транзисторов с V-образным затвором, некоторые из размеров которого меньше длины волны (рис.1), носит другой характер. В частности, облучение с лицевой и обратной стороны приводит к различным эффектам.

При облучении с лицевой стороны характеристики прибора практически не менялись в течение 10 импульсов лазерного излучения, в то время, как при облучении с обратной стороны происходила существенная деградация характеристик транзистора после 3–6 импульсов (рис.3). Это свидетельствует о том, что деградация происходит в локальной области вблизи острия затвора, а сам затвор при облучении с обратной стороны играет роль своеобразной антенны, концентрирующей поле лазерного излучения в рабочей области канала. При облучении с лицевой стороны концентрации излучения не происходит и его воздействие существенно слабее.

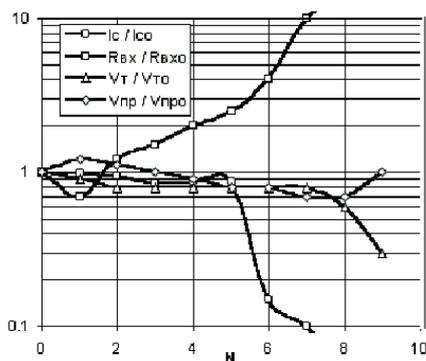


Рис.3
Деградация параметров короткоканального полевого транзистора с V-образным затвором при облучении неодимовым лазером с обратной стороны (т.е. со стороны подложки).

Для подтверждения локальности разогрева материала под действием оптического излучения проводились эксперименты, в которых варьировались величины теплоотвода от лицевой поверхности ПТ при их облучении с обратной стороны. При улучшении теплоотвода, даже в случае облучения с подложечной стороны и осуществлении теплоотвода через тонкий слой металлизации контактов, эффект

модификации все равно наблюдался, что свидетельствует о квазидиабатическом характере процессов, вызывающих изменение характеристик ПТ.

Анализ ВАХ и ВФХ показал, что модифицированная область располагалась под затвором и имела размеры не более 100 нм, а сопротивление более глубоких слоев осталось неизменным. По зависимости тока стока от времени, измеренного непосредственно в момент облучения, удалось оценить зависимость температуры канала транзистора от времени, которая весьма близко совпала с результатами расчетов (рис.2). Таким образом, различный характер влияния оптического излучения демонстрирует принципиальную возможность модификации свойств материала в наиболее важном месте полупроводниковой структуры транзистора – в канале.

б. Выводы

Проведенные эксперименты свидетельствуют о том, что возможна локальная модификация свойств материалов за счет концентрации поля лазерного излучения в заданном месте с помощью металлических объектов с нанометровыми размерами. Концентрация поля лазерного излучения таким способом позволяет производить модификацию материала в областях, размеры которых сравнимы с размерами кластера и значительно меньше длины волны излучения, что невозможно получить за счет фокусировки. Полученные результаты демонстрируют перспективность применения нанометровых металлических кластеров для изготовления электронных приборов.

Работа выполнена при поддержке гранта Отделения НАТО “Наука для Мира” SFP-973799 Semiconductors и гранта МНТП “Физика твердотельных наноструктур” (№99-1142).

Литература

- [1] Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Электродинамика сплошных сред. –М.: Наука, 1982.
- [2] Ваганов Р.Б., Каценеленбаум Б.Э. Основы теории дифракции. –М.: Наука, 1982.
- [3] Фелсен Л., Маркувиц Н. Излучение и рассеяние волн. –М.: Мир, 1978.
- [4] Мандельштам Л.И. Лекции по теории колебаний. –М.: Наука, 1972.
- [5] Абрикосов А.А. Основы теории металлов. –М.: Наука, 1987.
- [6] Handbook of optical constants of solids. /Edited by E.Palik. Academic press, 1985.
- [7] Оболенский С.В., Китаев М.А. //ПЖТФ. 2000. Т.26. С.13.

**New method of material modification by electrodynamic localization
of optic radiation⁺⁾**

S.V.Obolensky¹⁾

Nizhni Novgorod State University, Gagarin Avenue 23, Nizhni Novgorod 603950, Russia

V.A.Kozlov

*Microstructures Physics Institute of Russian Academy of Sciences
Nizhni Novgorod 603600, Russia*

M.A.Kitaev

*“SALYUT” the Research-and-Production Enterprise,
Nizhni Novgorod 603600, Russia*

V.K.Kiselev

*Research and Development Institute of Measuring Systems (NIIS),
Nizhni Novgorod 603950, GSP - 486, Russia*

We report on new method of electrodynamic localization of optic radiation by sharp metal objects. Typical size on which material modification occurs is much less than radiation wavelength. Localization of radiation is due to diffraction of radiation on wedge-shaped gate of quasi-ballistic field-effect transistor. Analysis of current-voltage and capacitance-voltage characteristics showed that modification of channel conductivity takes place only in the vicinity of gate spike. It was shown that with such technological procedure the increase of supply voltage range with stable amplification is possible.

^{+) Proc. NATO Project SfP-973799 Semiconductors 2nd Workshop. Nizhni Novgorod, 2002}

^{1) Phone: +7-8312-656032; Fax: +7-8312-656416; E-mail: obolensk@rf.unn.ru}