

Министерство образования и науки Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра физики полупроводников

**Математическое моделирование нелинейной динамики заряда и тока в
длинных высокоомных структурах арсенида галлия в условиях
локализованной засветки**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

Студента 4 курса 412 группы
направления 11.03.04 «Электроника и наноэлектроника»
факультета нано- и биомедицинских технологий

Нагимова Нурлана Салауатовича

Научный руководитель

Старший преподаватель кафедры физики полупроводников СГУ,

_____ А.В.Митин

должность, место работы, уч. степень, уч. звание подпись, дата инициалы, фамилия

Консультант

Заведующий кафедрой физики полупроводников СГУ,

д.ф.-м.н., профессор _____ А.И.Михайлов

должность, место работы, уч. степень, уч. звание подпись, дата инициалы, фамилия

Зав. кафедрой

Заведующий кафедрой физики полупроводников СГУ,

д.ф.-м.н., профессор _____ А.И. Михайлов

должность, место работы, уч. степень, уч. звание подпись, дата инициалы, фамилия

Саратов 2016 год

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования

Функциональная электроника является одним из направлений современной микроэлектроники. В своей основе функциональная электроника использует принципы физического моделирования и интеграции динамических неоднородностей.

При построении функциональных приборов и устройств используются нелинейные активные среды, которые на протяжении последних десятков лет активно исследуются и находят применение во всех научных и технических сферах.

Характерным примером нелинейной активной среды является арсенид галлия *n*-типа. В нем в сильных электрических полях вследствие междолинного переноса электронов возможно возникновение отрицательного дифференциального сопротивления (ОДС) и соответствующей неустойчивости тока (эффект Ганна), а также принципиально иной неустойчивости тока – рекомбинационной, или концентрационной, обусловленной зависящим от напряженности электрического поля сечением захвата электронов на глубокие примесные уровни.

Для анализа нелинейной динамики электронных процессов в структурах функциональных устройств используют феноменологические модели, среди которых наиболее известной является локально-полевая математическая модель.

В данной работе используется вариант локально-полевой математической модели, отличительной особенностью которого является добавление в систему уравнений дополнительного уравнения непрерывности для дырок, генерируемых светом.

Цель и задачи бакалаврской работы

Цель работы: установление и анализ особенностей нелинейной динамики пространственного заряда и тока в длинных высокоомных структурах $n^+ - n^- - n - n^+ - \text{GaAs}$ при одновременном действии дрейфового и концентрационного

механизмов неустойчивости тока в условиях локализованной засветки с учетом дырок генерируемых светом. Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- Анализ литературных данных по теоретическому и экспериментальному исследованию ганновской и рекомбинационной неустойчивостей тока в высокоомных полупроводниках.
- Формулировка системы уравнений локально-полевой математической модели, позволяющая учитывать влияние дырок, генерируемых светом.
- Разработка варианта алгоритма локально-полевой математической модели, позволяющей исследовать динамику заряда и тока в указанных структурах с учетом одновременного действия дрейфового и концентрационного механизмов неустойчивости в условиях локализованного оптического воздействия на активную область структуры.
- Проведение серии численных экспериментов, направленных на выявление особенностей нелинейной динамики пространственного заряда и тока в исследуемых структурах.
- Анализ полученных результатов.

Краткая характеристика материалов исследования

В работе проведено исследование влияния локализации области засветки на динамику заряда и тока в структурах на основе высокоомного арсенида галлия в условиях действия дрейфового и рекомбинационного механизмов неустойчивостей тока и с учетом дырок, генерируемых светом.

Описание структуры работы

Выпускная квалификационная работа включает введение, три раздела, в которых обсуждается основное содержание работы, заключение и список литературы из 33 источников, изложена на 42 страницах, содержит 20 рисунков. Во введении описана актуальность темы исследования, раскрыта новизна работы, а также сформулированы цель и задачи исследования. В первой главе проведен анализ литературы, посвящённый рассмотрению типов

неустойчивостей тока и механизмов управления ими. Далее рассматриваются варианты практического использования математического моделирования для решения различных типов конкретных прикладных задач. Затем проводится сравнительный анализ температурной и локально -полевой математической модели, достоинства применения и ограничения использования. Во второй главе описывается экспериментальная часть работы, состоящая из двух частей:

- 1) постановка задач
- 2) формулировка системы уравнений.

В третьей части проводится анализ полученных результатов. В заключении сформулированы основные выводы по результатам проведенного исследования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В предлагаемой локально-полевой математической модели формулируется система уравнений, включающая в себя уравнения непрерывности и Пуассона, выражение для плотности полного тока для электронного полупроводника (монополярный случай), уравнение кинетики захвата и генерации электронов глубокими примесными уровнями.

В рамках данной работы был использован упрощённый вариант локально-полевой модели, в котором только дрейфовая скорость электронов $v_n(E)$ считалась локальной и мгновенной функцией напряжённости электрического поля E и задавалась аналитическим выражением:

$$v_n(E) = \frac{\mu_n E + v_s (E / E_{ap})^4}{1 + (E / E_{ap})^4}$$

Кроме того, дрейфовая скорость дырок v_p так же, как и для электронов, считалась локальной и мгновенной функцией напряженности электрического поля E и задавалась аналитическим выражением:

$$v_p(E) = \frac{\mu_p E}{1 + \mu_p E / v_s},$$

Система уравнений в одномерном случае имеет вид:

$$\frac{\partial n(x,t)}{\partial t} = -v_n(E(x,t)) \cdot \frac{\partial n(x,t)}{\partial x} - n(x,t) \cdot \frac{\partial v_n(E(x,t))}{\partial x} + D_n \cdot \frac{\partial^2 n(x,t)}{\partial x^2} + e(N_T(x) - N_{T-}(x,t)) - c(E(x,t))n(x,t)N_{T-}(x,t) + G(x) - \frac{\Delta p(x,t)}{\tau_n} ,$$

$$\frac{\partial p(x,t)}{\partial t} = v_p(E(x,t)) \cdot \frac{\partial p(x,t)}{\partial x} + p(x,t) \cdot \frac{\partial v_p(E(x,t))}{\partial x} + D_p \cdot \frac{\partial^2 p(x,t)}{\partial x^2} + G(x) - \frac{\Delta p(x,t)}{\tau_n} ,$$

$$j(t) = \frac{q}{L} \int_0^L \left\{ n(x,t) \cdot v_n(E(x,t)) + p(x,t) \cdot v_p(E(x,t)) \right\} dx + \frac{q}{L} \int_0^L \left\{ D_p \cdot \frac{\partial p(x,t)}{\partial x} - D_n \cdot \frac{\partial n(x,t)}{\partial x} \right\} dx + \frac{\varepsilon \varepsilon_0}{L} \frac{\partial U(t)}{\partial t} ,$$

$$\frac{\partial E(x,t)}{\partial t} = \frac{q}{\varepsilon \varepsilon_0} (n(x,t) - N_D(x) + (N_T(x) - N_{T-}(x,t)) - p(x,t)) ,$$

$$\frac{\partial N_{T-}(x,t)}{\partial t} = e(N_T - N_{T-}) - c(E(x,t))n(x,t)N_{T-}(x,t)$$

$$U(t) = \int_0^L E(x,t) dx ,$$

$$\Delta n(x,t) = p(x,t) \quad , \quad \Delta p(x,t) = p(x,t) \quad ,$$

Последние выражения означают, что рекомбинация происходит только с участием дырок, генерируемых светом.

Зависимость коэффициента захвата носителей заряда глубокими примесными уровнями от напряженности электрического поля задается выражением вида:

$$c(E) = c_0 \left[1 + 9 \cdot \frac{(E/2100)^4}{1 + (E/2100)^4} \right]$$

Для решения полученной системы уравнений (1) – (8) формулировались следующие начальные и граничные условия:

Начальные условия:

$$E(x,0) = U_0 / L,$$

$$n(x,0) = N_D(x),$$

$$j(0) = 0,$$

$$p(x,0) = 0$$

Граничные условия:

$$n(0,t) = N_D(0),$$

$$n(L,t) = N_D(L),$$

$$E(0,t) = E(L,t) = E_c$$

$$\int_0^L E(x,t) dx = U_0$$

$$p(0,t) = p(L,t) = 0$$

Для исследования было выбрано три области для воздействия оптическим излучением: прикатодная область, середина активной области и область вблизи анода. Длина активной области структуры $L_0 = 500$ мкм, концентрация доноров в основной ее части $N_D = 4 \cdot 10^{13}$ см⁻³; ширина области засветки $d = 98$ мкм. Времена жизни электронов и дырок принимались равными $\tau_n = \tau_p = 10^{-8}$ с.

Локальность засветки осуществлялась заданием пространственного распределения интенсивности светового возбуждения вдоль освещаемой области конечной ширины d посредством введения пространственной функции $G(x)$, определяющей скорость генерации электронов и дырок светом и принимаемой идентичной для электронов и дырок:

$$G(x) = \begin{cases} 0, & \text{при } x < x_0 - \frac{d}{2}, \\ G_{\max} \cdot \frac{1}{2} \left[1 + \cos \left(2\pi \cdot \frac{(x - x_0)}{d} \right) \right], & \text{при } x_0 - \frac{d}{2} \leq x \leq x_0 + \frac{d}{2}, \\ 0, & \text{при } x > x_0 + \frac{d}{2}, \end{cases}$$

где x_0 – координата середины освещаемой области

Для исследования особенностей нелинейной динамики заряда и тока проводились численные эксперименты по изучению влияния локализованной засветки активной области структуры на динамику тока и пространственного заряда.

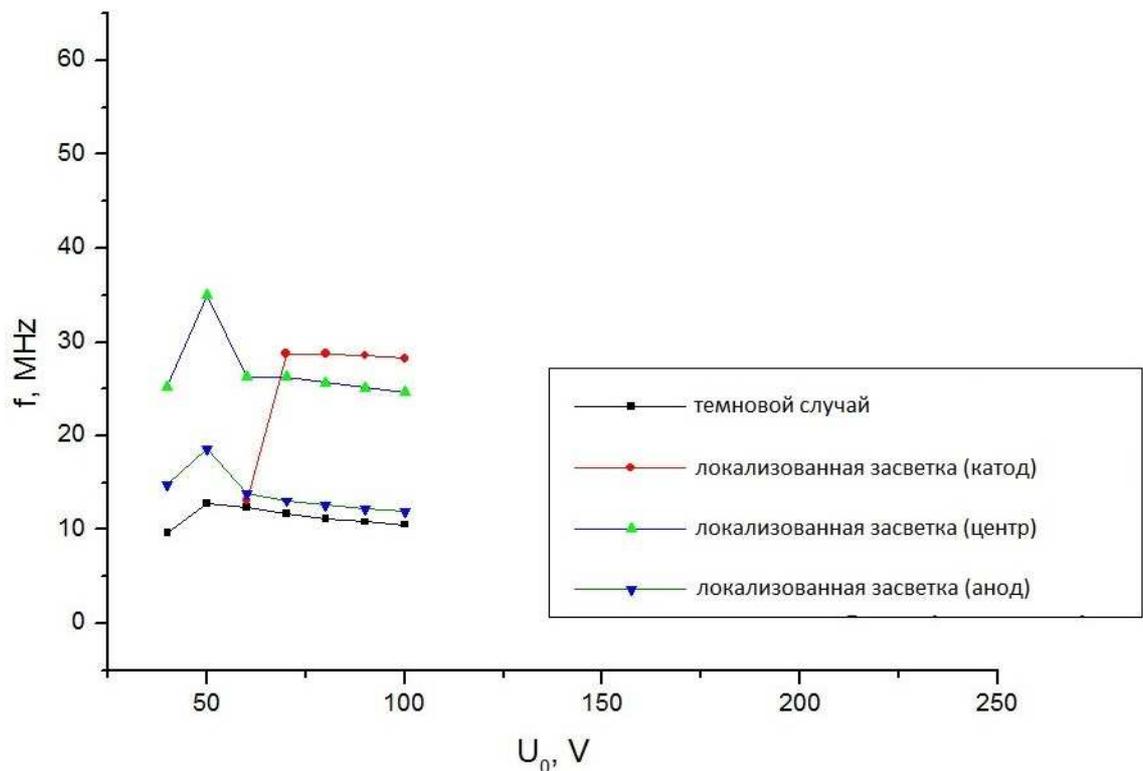


Рисунок 1 - Зависимости частоты генерируемых колебаний тока f от приложенного напряжения U_0 , рассчитанные для случая без засветки, для локальной засветки вблизи катода, анода и в середине активной области при большей интенсивности засветки $G_{\max} = 4 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ и ширине активной области $d = 98 \text{ мкм}$

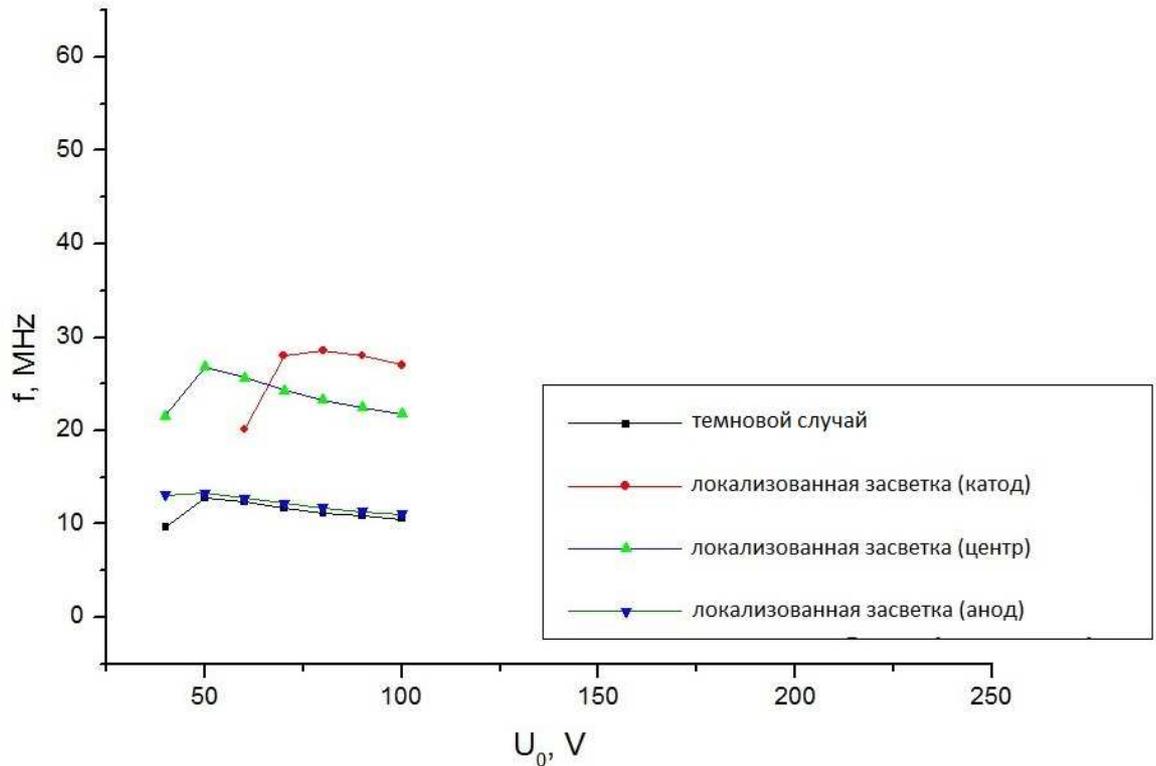


Рисунок 2 - Зависимости частоты генерируемых колебаний тока f от приложенного напряжения U_0 , рассчитанные для случая без засветки, для локальной засветки вблизи катода, анода и в середине активной области при меньшей интенсивности засветки $G_{max} = 14 \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3} \cdot \text{с}^{-1}$ и ширине освещенной области $d = 98 \text{ мкм}$

При локальной засветке структуры вблизи катода наблюдается значительное увеличение частоты генерируемых колебаний в диапазоне прикладываемых напряжений от 60 до 70 В. Анализ динамики заряда и тока при локальной засветке образца вблизи катода показал, что увеличение порогового напряжения возникновения неустойчивости в структуре связано с образованием на катоде статического домена, который препятствует формированию подвижного рекомбинационного домена при меньших значениях напряжениях (вплоть до порогового напряжения). Это наблюдение может быть объяснено тем, что при увеличении значения прикладываемого напряжения поле в статическом домене возрастает, а в остальной части образца

остаётся недостаточным для образования домена сильного электрического поля до достижения значения напряжения $U_0 = 60$ В.

Зависимость $f(U_0)$, соответствующая случаю локального освещения образца в середине активной области структуры характеризуется наличием выраженного максимума частоты генерации при достижении напряжения $U_0 = 60$ В (рисунки 1 и 2). Распространение домена до области засветки (середины структуры) и последующий уход в анод обуславливает увеличение частоты колебаний тока практически в 2 раза по сравнению с неосвещённым образцом во всем диапазоне напряжений. Повышение напряжения U_0 приводит к увеличению ширины домена и максимального значения напряженности поля в нём.

На рисунках 1 и 2 видно, что при локальной засветке вблизи анода характер зависимости $f(U_0)$ остаётся практически таким же, как и в темновом случае.

Уменьшение частоты генерируемых колебаний тока в области больших напряжений может быть обусловлено увеличением напряженности электрического поля в заряженном слое по мере увеличения прикладываемого напряжения, что в итоге приводит к замедлению электронов.

На следующем этапе исследования была проведена серия численных экспериментов по изучению влияния величины постоянного приложенного напряжения на спектральный состав тока при различной локализации засветки.

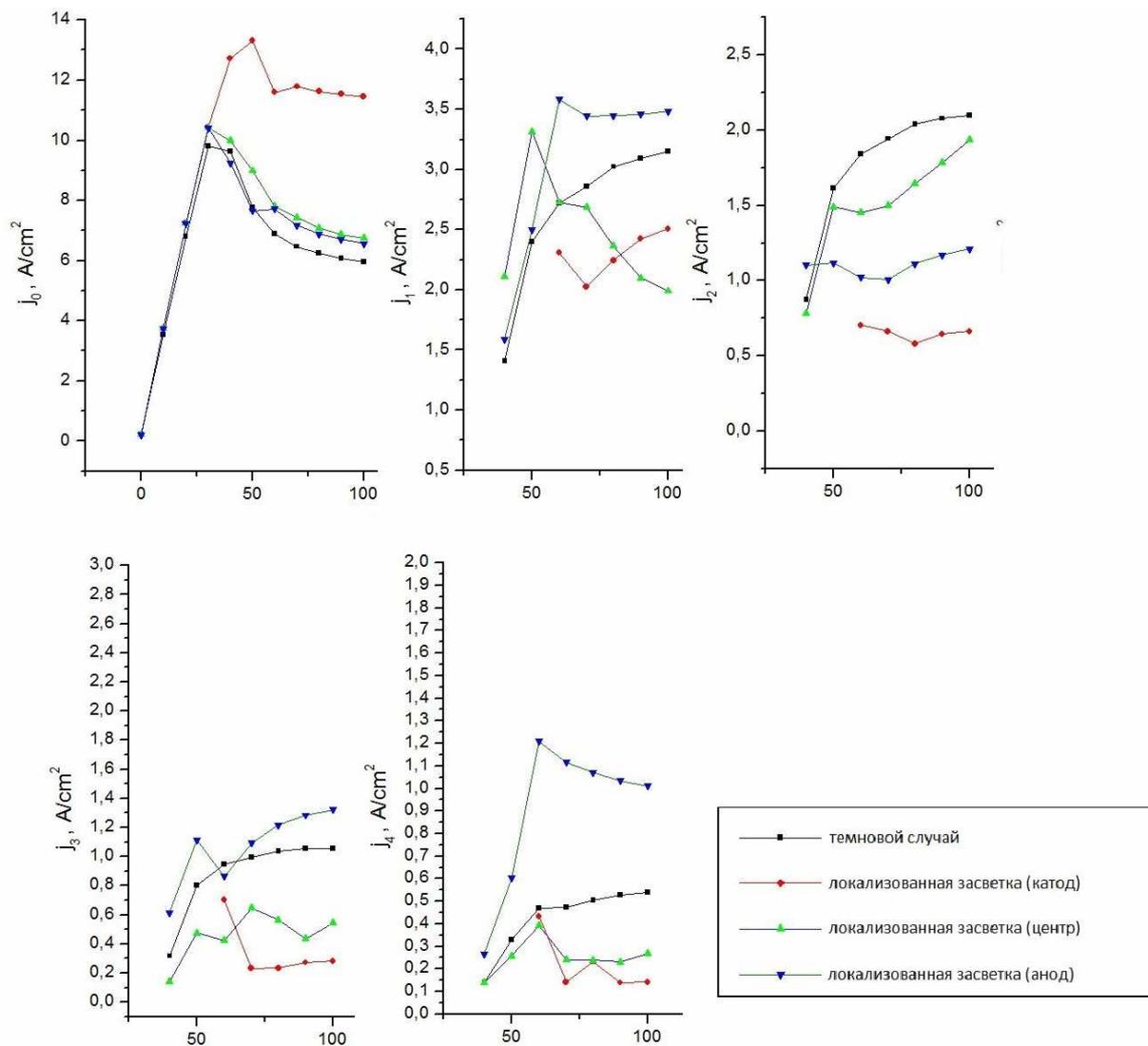


Рисунок 3 - Зависимости амплитуд постоянной составляющей и четырех гармоник тока от величины постоянного приложенного напряжения при различной локализации засветки

На рисунке 3 приведены зависимости постоянной составляющей и амплитуд первых четырех гармоник j_1, j_2, j_3, j_4 в спектре полного тока от приложенного напряжения U_0 (без освещения, при локальной засветке вблизи катода, вблизи анода и в середине активной области структуры).

На зависимости постоянной составляющей полного тока j_0 от величины приложенного напряжения наблюдается участок отрицательной дифференциальной проводимости, что полностью соответствует теоретическим представлениям.

Из представленных на рисунке 3 зависимостей видно, что спектральный состав генерируемых колебаний тока в существенной степени определяется величиной приложенного постоянного напряжения и локализацией области засветки и обусловлен сложной динамикой электронных процессов в исследуемых структурах.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование особенностей динамики пространственного заряда и тока в структурах $n^+ - n^- - n - n^+ - \text{GaAs}$ с длиной активной области 500 мкм, концентрацией доноров в активной области структуры $N_D = 4 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$ в условиях дрейфового и концентрационного механизмов неустойчивости (при доминировании последнего) в условиях локализованной засветки показало:

1. При локальной засветке структуры вблизи катода наблюдается увеличение порогового напряжения возникновения токовых колебаний (от $U_0 = 40 \text{ В}$ до $U_0 = 60 \text{ В}$) и значительное увеличение частоты (примерно в 3 раза) генерируемых колебаний в диапазоне прикладываемых напряжений от 70 до 100 В по сравнению с темновым случаем.
2. Зависимость $f(U_0)$, соответствующая случаю локального освещения образца в середине активной области структуры, характеризуется увеличением частоты (примерно в 2,5-3 раза) генерируемых колебаний практически во всем диапазоне прикладываемых напряжений по сравнению с темновым случаем.
3. При локальной засветке структуры вблизи анода характер зависимости $f(U_0)$ остается практически таким же, как и в темновом случае, наблюдается лишь небольшое увеличение частоты генерируемых колебаний тока во всем диапазоне прикладываемых напряжений.
4. Изменяя интенсивность локализованной засветки можно управлять пороговым напряжением, что может иметь практическое применение для создания функциональных приборов на основе GaAs.