

УДК 535.218;535.241.13;625.315.592

ДЕЙСТВИЕ РАДИАЦИИ НА ПАРАМЕТРЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ОПТИЧЕСКИХ МОДУЛЯТОРОВ

В. И. Ирха, И. М. Викулин

Одесская национальная академия связи им. А. С. Попова
Кузнечная, 1, Одесса 65029, Украина, тел: (048) 723-61-18,
E-mail: phys@onat.edu.ua

ДЕЙСТВИЕ РАДИАЦИИ НА ПАРАМЕТРЫ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ОПТИЧЕСКИХ МОДУЛЯТОРОВ

В. И. Ирха, И. М. Викулин

Аннотация. В работе рассматриваются возможности создания полупроводниковых оптических модуляторов на основе германия для ИК области спектра. Исследуется зависимость эффективности модуляции от концентрации инжектированных в n -базу носителей заряда. Определено влияние γ -облучения на характеристики модуляторов.

Ключевые слова: p - n -переход, инжекция, оптический модулятор, эффективность модуляции, время жизни носителей заряда, γ - кванты

ДІЯ РАДІАЦІЇ НА ПАРАМЕТРИ НАПІВПРОВІДНИКОВИХ ОПТИЧНИХ МОДУЛЯТОРІВ

В. І. Ірха, І. М. Вікулін

Анотація. В роботі розглядаються можливості створення напівпровідникових оптичних модуляторів на основі германію для ІЧ області спектру. Досліджується залежність ефективності модуляції від концентрації інжекттованих в n -базу носіїв заряду. Виявлено вплив γ -опромінення на характеристики модуляторів.

Ключові слова: p - n - перехід, інжекція, оптичний модулятор, ефективність модуляції, час життя носіїв заряду, γ -кванти

INFLUENCE OF RADIATION ON PARAMETERS OF SEMICONDUCTING OPTICAL MODULATORS

V. I. Irkha, I. M. Vikulin

Abstract. Possibilities of manufacturing of semiconducting optical modulators based on germanium for the IR-range of spectrum are discussed. Dependence of efficiency of modulation from concentration charge carriers that injected in n -base is researched. Influence of γ -irradiation on characteristics of modulators is defined.

Keywords: p - n -junction, injection, optical modulator, efficiency of modulation, lifetime of the change carries, γ -quanta

В современном информационном мире возникла проблема передачи громадных объемом информации, что требует новых методов ее обработки, передачи и хранения. Эффектив-

ность оптических методов передачи информации на несколько порядков выше, чем электронных. Быстрое развитие оптоэлектроники позволяет выявить новые функциональные

возможности, на основе которых могут быть созданы более современные приборы для этих целей [1,2], а также увеличило интерес к проблемам модуляции и сканирования света [3]. Управление оптическим излучением — процесс, приводящий к изменению одного или нескольких параметров, характеризующих оптическое излучение (амплитуда, частота, фаза, плоскость поляризации и т.д.). Устройства, позволяющие управлять этими величинами, принято называть модуляторами. В настоящее время известны различные способы модуляции оптического излучения. Одним из самых распространенных типов полупроводниковых оптических модуляторов являются модуляторы, действующие на принципе инжекции неосновных носителей заряда в объем полупроводника через p - n -переход, смещенный в пропускном направлении. Изменение оптического пропускания за длинноволновым краем собственного поглощения материала обусловлено поглощением ИК- света свободными носителями заряда. [4...7].

Инжекция носителей из p - n -перехода изменяет общую концентрацию носителей заряда в полупроводнике, а это в свою очередь приводит к изменению коэффициента поглощения света в нем и модуляции проходящего через кристалл света в соответствии с приложенным напряжением [1,3].

В настоящей работе анализируются возможности создания полупроводникового оптического модулятора на основе Ge и исследуется зависимость коэффициента поглощения света от концентрации инжектированных в n -базу носителей заряда, определяется влияние γ -облучения на характеристики прибора. Использование Ge связано с большой диффузионной длиной носителей заряда.

В процессе проведенных исследований нами разработаны полупроводниковые модуляторы на основе p - n -перехода с длинной базой, через n -область которых пропускался луч света, различные по конфигурации с применением различных полупроводниковых материалов [4,5,7].

Как отмечалось ранее, при реализации поглощения на свободных носителях заряда в полупроводнике, управляя концентрацией этих носителей, можно изменять прозрачность материала по отношению к ИК излучению. Глубина модуляции проходящего через кристалл

света определяется уровнем инжекции неосновных носителей заряда [1,3]. Модуляция при этом может наблюдаться не только для проходящего луча, но и для отраженного, поскольку коэффициент отражения от границы раздела двух сред является функцией коэффициентов преломления и прозрачности среды.

Для исследования электрооптических характеристик образцы модуляторов изготавливались на основе монокристаллов германия n -типа проводимости, легированного сурьмой с удельным сопротивлением $\rho = 4...50$ Ом см. Кристаллы в виде параллелепипедов размером $2 \times 2 \times 4$ мм³ шлифовались, полировались и обезжиривались в четыреххлористом углероде. Химическое травление проводили в полирующем травителе СР-4 при $T=70^\circ\text{C}$. Одной из проблем при изготовлении модулятора ИК излучения таких размеров является создание однородного инжектирующего контакта по всей площади одной из плоскостей кристалла и омического контакта на противоположной плоскости. Приборы получали методом сплавления. Для достижения воспроизводимости результатов создание p - n -переходов и омических контактов проводили в едином цикле в вакууме порядка 10^{-5} мм рт.ст. в графитовых кассетах под давлением для предотвращения образования капель при нагреве.

Изучение вольт-амперных характеристик наших структур показало, что в данном случае имеет место генерационно-рекомбинационный механизм протекания тока.

Т.к. длина базы модуляторов больше диффузионной длины неосновных носителей заряда, следовательно, при описании вольт-амперных характеристик исследованных структур необходимо учитывать падение напряжения на базе. Существование генерационно-рекомбинационного механизма на основе n - Ge свидетельствует также и о наличии глубоких уровней в исходном материале, через которые идет частичная рекомбинация инжектированных носителей. Существование такой рекомбинации приводит к снижению эффективности инжекции носителей заряда в базу.

На рис. 1 представлена зависимость эффективности модуляции m ИК излучения от величины тока, протекающего через структуру, при приложении прямого смещения с различной длительностью импульсов. Эффективность модуляции определялась как

$$m = \frac{I_0 - I}{I_0} \cdot 100\%, \quad (1)$$

где I_0 — интенсивность света, прошедшего через полупроводниковый материал при отсутствии инъекции носителей заряда, I — интенсивность света при инъекции носителей. При токах $i > 3$ А происходит насыщение рабочей области модулятора инжектированными носителями заряда. Одной из причин насыщения эффективности модуляции является падение эффективности инъекции носителей из p - n -перехода при разогреве структуры. Подтверждением этого служит снижение эффективности модуляции при питании импульсами тока большей длительности (кривая 2 рис.1).

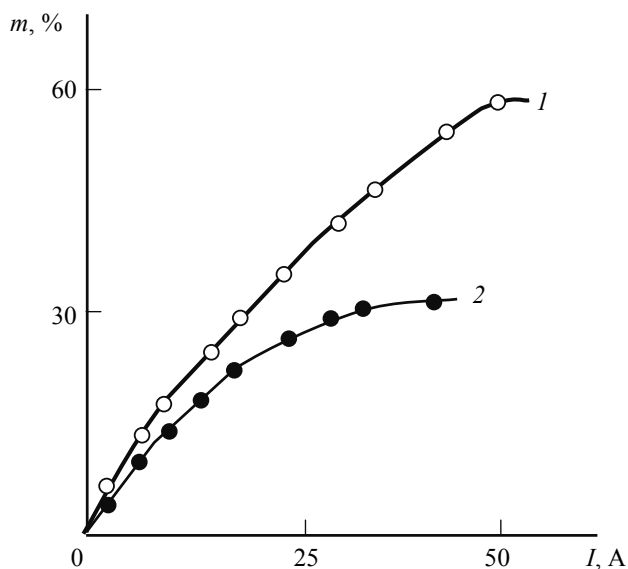


Рис. 1. Зависимость эффективности модуляции от величины тока инъекции: 1 — длительность импульса 200 мкс, частота 30 Гц; 2 — длительность импульса 1 мс, частота 30 Гц

Исследована зависимость эффективности модуляции от длительности импульсов внешнего напряжения t (рис.2). Измерения показали, что величина m не зависит от частоты следования импульсов в диапазоне $f = 30 \dots 300$ Гц, однако зависит от длительности импульсов t . Насыщение зависимости $m(t)$ определяется тем, что имеется предельная величина “закачиваемого” в рабочую область модулятора заряда, при превышении которой рост концентрации носителей уравнивается рекомбинационными процессами. Чем ниже удельное сопротивление кристалла, тем при меньших t наступает это уравнивание (кривая 2 рис.2). Кроме того, для меньших величин ρ эффек-

тивность m ниже из-за меньшей эффективности инъекции неосновных носителей заряда в объем полупроводника.

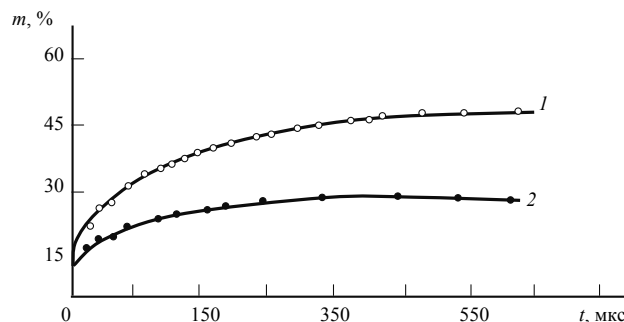


Рис. 2. Зависимость эффективности модуляции от длительности импульса. Ток -2 А, частота 30 Гц. 1-30 Ом·см, 2-14 Ом·см

Необходимо отметить, что концентрация инжектированных из p - n -перехода неравновесных носителей заряда, движущихся к омическому контакту, спадает в объеме полупроводника по экспоненциальному закону. Поэтому при модуляции луча с большой апертурой концентрация носителей заряда в модуляторе по сечению луча будет неодинакова, что приведет к различному коэффициенту поглощения света по этому сечению, а, следовательно, и к неоднородности глубины модуляции в различных участках рабочей области. Нами в работах [4,5,7] предложены способы повышения глубины и однородности модуляции. Путем подбора геометрии модулятора (трапеции, диск и т.д.) можно также увеличить однородность модуляции. Создание в базе структур встроенных квазиэлектрических полей (неоднородное легирование, варизонный профиль), а также реализация суперинжекции позволяет также увеличить глубину и однородность модуляции.

Однако для использования полупроводниковых модуляторов в устройствах и системах оптоэлектроники необходимо, чтобы их параметры были стабильны во времени, при изменении температуры, при воздействии проникающей радиации. Физические процессы, связанные с воздействием ионизирующего излучения на них, остаются пока полностью невыясненными.

В работе [8] показано, что электрофизические свойства полупроводников и приборов на их основе сильно изменяются при воздействии ионизирующего излучения. Основными электрофизическими характеристиками полу-

проводниковых материалов, определяющими электрические параметры полупроводниковых приборов, являются: концентрация носителей заряда n ; подвижность μ ; время жизни носителей заряда τ и их диффузионная длина L . Важность каждого из параметров определяется типом полупроводникового прибора и электрическим режимом его работы. При радиационном облучении полупроводниковых материалов образуются в запрещенной зоне центры рекомбинации, которые и определяют изменение всех электрофизических характеристик материала.

Возникновение радиационных дефектов, имеющих глубокие энергетические уровни в запрещенной зоне полупроводника, приводит к возрастанию скорости объемной рекомбинации, т.е. к снижению времени жизни пар неравновесных носителей заряда в полупроводнике. Это связано с тем, что в большинстве случаев время жизни неравновесных носителей заряда в полупроводнике определяется не прямой рекомбинацией, а через энергетические уровни, введенные облучением в кристалл.

При облучении в запрещенную зону полупроводника вводится целая система энергетических уровней, многие из которых могут быть рекомбинационными, но время жизни в облученном кристалле определяется лишь одним-двумя доминирующими рекомбинационными центрами [9]. При достаточно малой концентрации рекомбинационных центров по сравнению с концентрацией равновесных носителей заряда время жизни носителей заряда может быть вычислено из выражения:

$$\tau = \frac{(1/c_p)(n_0 - n_1) + (1/c_n)(p_0 + p_1)}{N_r(n_0 + p_0)}, \quad (2)$$

где $C_n = \sigma_n v_n$; $C_p = \sigma_p v_p$ — постоянные захвата электронов и дырок соответственно; $\sigma_n \sigma_p$ — сечения захвата электронов и дырок; $v_n v_p$ — тепловые скорости электронов и дырок; n_0, p_0 — равновесные концентрации электронов и дырок; N_r — концентрация рекомбинационных центров; n_1, p_1 — равновесные концентрации электронов и дырок, когда уровень Ферми совпадает с рекомбинационным центром.

Как видно из уравнения (2), в случае одного доминирующего уровня обратное время жизни $1/\tau$ будет пропорционально концентрации рекомбинационных центров N_r . Поэтому при

постоянной температуре изменение $1/\tau$ может характеризовать собой изменение вводимых облучением рекомбинационных центров. Тогда уравнение (2) может быть представлено в виде:

$$\Delta\left(\frac{1}{\tau}\right) = \frac{1}{\tau} - \frac{1}{\tau_0} = \Delta(E_g) \sigma_c v f_g(E_p - E_F) \Phi, \quad (3)$$

где τ_0 — время жизни неосновных носителей заряда до облучения, τ — время жизни неосновных носителей заряда после облучения; $\Delta(E_g)$ — вероятность образования рекомбинационного центра бомбардирующей частицей; Φ — интегральный поток облучения; $f_g(E_p - E_F)$ — вероятность того, что рекомбинационный центр занят основным носителем; E_F — уровень Ферми; $N_r = \Delta(E_g) \Phi$ — концентрация рекомбинационных центров; $\sigma_c v$ — постоянная захвата рекомбинационным центром неосновных носителей.

Из выражения (3) видно, что изменение обратного времени $\Delta\left(\frac{1}{\tau}\right)$ при облучении пропорционально концентрации рекомбинационных центров или интегральному потоку облучения

$$\Delta(1/\tau) = \left(\frac{1}{\tau} - \frac{1}{\tau_0}\right) = K_\tau \Phi, \quad (4)$$

где K_τ — коэффициент радиационного изменения времени жизни неосновных носителей заряда, зависящий от концентрации основных носителей заряда, скорости введения радиационных центров, их рекомбинационных свойств (сечений захвата электронов и дырок), а также от их эффективности.

Мы проводили расчеты по изменению времени жизни носителей заряда в германиевых оптических модуляторах с p - n -переходом при их облучении слабо поглощаемым γ -излучением Co^{60} при 300К. На рис. 3 представлена зависимость времени жизни носителей заряда от интегрального потока γ -квантов. Наблюдается линейное уменьшение времени жизни с ростом дозы облучения.

С учетом того, что время жизни τ и диффузионная длина носителей заряда L связаны соотношением $L = \sqrt{D\tau}$, (D — коэффициент диффузии неосновных носителей заряда) выражение (3) можно представить в виде

$$1/L = 1/L_0^2 + K_L \Phi, \quad (5)$$

где L_0 — диффузионная длина носителей заряда до облучения; K_L — коэффициент радиационного изменения диффузионной длины носителей заряда. Для использованного нами германия с удельным сопротивлением 30 Ом см длина диффузии дырок в n -область модулятора составлена $\sim 1,8$ мм. В процессе облучения γ -квантами она уменьшилась до 1,65 мм при дозе облучения $1 \cdot 10^{17}$ кв/см². Кроме того с ростом дозы облучения γ -квантов наблюдается уменьшение концентрации основных носителей заряда. Это связано с тем, что при облучении вводятся дефекты, компенсирующие основную легирующую примесь. Все сказанное выше приводит к значительному снижению эффективности модуляции полупроводниковых оптических модуляторов, работающих на поглощение света на инжектированных из p -перехода неосновных носителях заряда при радиационном воздействии. На рис.4 приведена зависимость эффективности модуляции от интегрального потока γ -квантов, подтверждающая приведенные результаты.

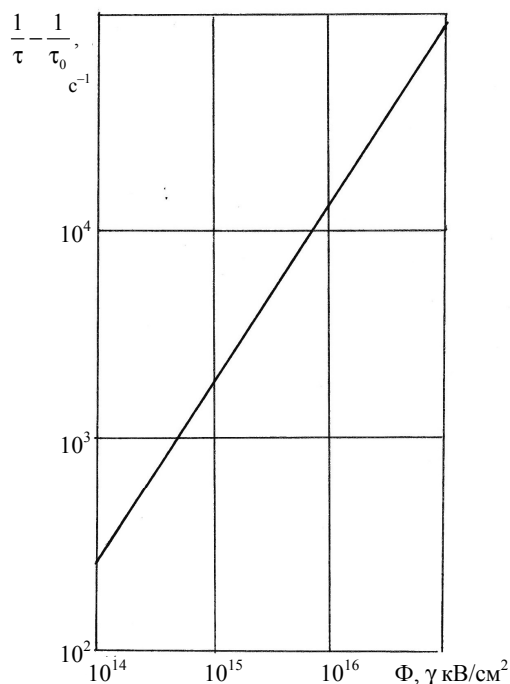


Рис. 3. Зависимость времени жизни носителей заряда от интегрального потока γ -квантов

Таким образом, при радиационном воздействии на полупроводниковые оптические модуляторы с ростом дозы облучения γ -квантов снижается глубина и однородность модуляции по сечению луча, что связано с изменением

электрофизических характеристик материала при облучении.

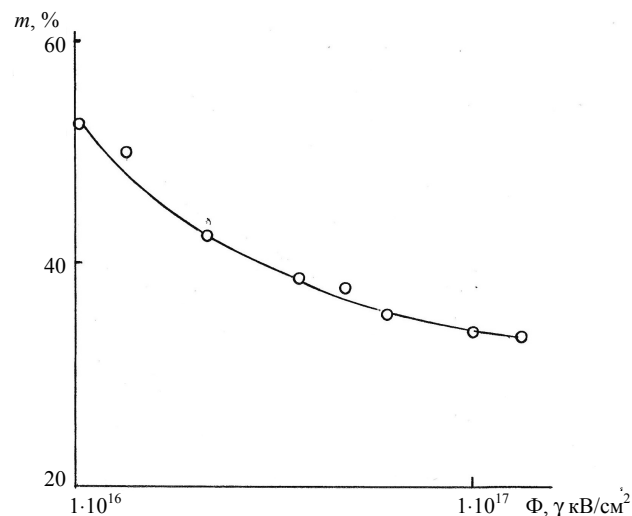


Рис. 4. Зависимость эффективности модуляции от интегрального потока γ -квантов

Литература

1. Мустель Е. Р. Методы модуляции и сканирования света /Мустель Е. Р., Парыгин В. Н. — М. Наука, 1970. — 296с.
2. Свечников Г. С. Интегральная оптика /Свечников Г. С. — К. Наукова думка, 1988. — 168с.
3. Викулин И. М. Полупроводниковые модуляторы ИК излучения/ Викулин И. М., Ирха В.И., Панфилов И. П. — Одесса, 1995. — 50с.
4. А.с. СССР 1730931 МКИ³ G 02 F1/015; 1/03. Оптический модулятор /В. И. Ирха, И. М. Викулин, Ю. Н. Максименко, Б. И. Буряк (СССР), заявл. 14.06.89; опубл. 3.01.92.
5. А.с. СССР 1745062 МКИ³ G02 F1/015. Полупроводниковые оптический модулятор /В. И. Ирха, Ш. Д. Курмашев, И. М. Викулин (СССР), заявл. 11.08.89; опубл. 1.03.92.
6. Викулин И. М. Полупроводниковые оптоэлектронные модуляторы /Викулин И. М., Ирха В.И., Панфилов М. И. — Киев: Информатика и связь. — 1995. — С.48-51.
7. Пат. 26020 Украина МПК G02 F1/00/ Оптический модулятор. — Викулин И. М., Ирха В.И., Панфилов М. И.; -№0200705531; заявл. 21.05.07; опубл. 27.08.07. Бюл. №13.
8. Емцев В. В. Примеси и точечные дефекты в полупроводниках /Емцев В. В., Машовец Т.В. — М. Радио и связь, 1981. — 248с.
9. Кулаков В. М. Действие проникающей радиации на изделия электронной техники /Кулаков В.М., Ладыгин Е. А., Шаховцов В. И. — М. Сов. радио, 1980. — 224с.