

## ЕЛЕКТРОНІКА

УДК 621.315.592; 621.382.3

Ирха В.И.  
Iرخа В.І.  
Irkha V.I.

### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПЛАЗМЕННОГО ЭФФЕКТА ДЛЯ МОДУЛЯЦИИ ОПТИЧЕСКОГО СИГНАЛА

#### ВИКОРИСТАННЯ ПЛАЗМОВОГО ЕФЕКТУ ДЛЯ МОДУЛЯЦІЇ ОПТИЧНОГО СИГНАЛУ

#### APPLICATION OF PLASMA EFFECT FOR MODULATION OF AN OPTICAL SIGNAL

**Аннотация.** Проведено исследование возможности управления оптическим излучением с помощью плазменного эффекта. Рассмотрены преимущества такой модуляции.

**Анотація.** Проведено дослідження можливості управління оптичним випромінюванням за допомогою плазмового ефекту. Розглянуто переваги такої модуляції.

**Summary.** An investigation of a possibility of control of optical radiation by means of plasma effect is carried out. Advantages of such modulation is considered.

В настоящее время возникла проблема передачи громадных объемов информации, что потребовало новых методов ее обработки, передачи и хранения. Поэтому широкополосность и двухмерность электромагнитных колебаний оптического диапазона, электрическая нейтральность фотонов лучше всего соответствует обработке и передаче больших массивов информации по волоконно-оптическим системам передачи, где возможны предельно большие плотности информации в канале и высокие скорости ее передачи, которые недостижимы в электронных системах. Эффективность оптических методов передачи информации на несколько порядков выше, чем электронных. Бурное развитие оптоэлектроники позволяет выявить новые функциональные возможности, на основе которых могут быть созданы более современные приборы для этих целей.

В оптических системах передачи носителем информации является модулируемый в пространстве и во времени световой луч, а это в свою очередь резко увеличивает интерес к проблемам модуляции и сканирования света, а, следовательно, и к разработке новых видов модуляторов [1,2]. Функциональная роль модуляторов света довольно многогранна. Большинство используемых принципов модуляции света в оптике давно известны. В основном они основываются на изменении действительной или мнимой частей диэлектрической проницаемости среды, приводящей к модуляции фазы или амплитуды проходящего света. Созданы различные типы модуляторов света, основанные на электрооптических и магнитооптических эффектах. Наиболее распространены модуляторы, использующие линейный электрооптический эффект. Они же являются и наиболее широкополосными, но для их работы необходимы большие напряжения модулирующего сигнала [3]. В каждом конкретном случае выбор способа модуляции светового потока определяется исходя из вида передаваемой информации, требований к интенсивности светового потока, к глубине модуляции, мощности модулируемого сигнала и т. д. Однако, несмотря на большое количество работ, посвященных теоретическим исследованиям и практическим применениям оптических модуляторов, вопрос о взаимодействии светового луча с электронной подсистемой в полупроводниках практически не изучен.

Цель данной работы – исследовать возможность управления оптическим излучением с помощью плазменного эффекта. Необходимость решения такой задачи связана и с тем, что скорость быстрого действия систем автоматики и информатики ограничивается инерционностью электронных потоков, на основе которых они создаются. Необходим переход на световые управляемые потоки для увеличения быстрого действия на несколько порядков. Носителями информации в электронных потоках являются заряженные частицы, которыми можно управлять с помощью электрических полей. В световых же потоках носителями информации являются фотоны, управление которыми затруднено и является важной проблемой.

Известно, что полупроводники относительно хорошо прозрачны для длинноволнового излучения за краем собственного поглощения. В этой области спектра пропускание полупроводника может быть изменено свободными носителями путем изменения их концентрации или подвижности. Существуют различные способы амплитудной модуляции оптического сигнала. Для их осуществления применяют методы, основанные на изменении коэффициента поглощения света средой. Хотя при

такой модуляции имеют место потери световой энергии в модулирующем устройстве, однако она дает возможность создать простые модуляторы, потребляющие малую мощность. Есть ряд механизмов, обеспечивающих управляемое поглощение света полупроводниковым материалом. Но на практике нашло применение лишь поглощение на свободных носителях и поглощение, связанное с электронными переходами из валентной зоны в зону проводимости [4 ... 6]. Недостатками такого способа является сравнительно невысокие глубина, скорость и однородность модуляции. Они обусловлены тем, что трудно получить большие изменения коэффициента поглощения только инжекцией свободных носителей заряда даже в условиях внешнего нагрева.

Как уже говорилось, управлять световым потоком можно изменением показателя преломления в направляющих системах, которое может достигаться за счет электрооптического эффекта. Но такое управление не эффективно из-за необходимости наличия сильных электрических полей, а также из-за перестройки кристаллической решетки, что ограничивает быстродействие соответствующих структур.

В работе рассматривается возможность управления оптическим сигналом с помощью свободных электронов. В основе такого управления лежат два явления – поглощение светового луча, связанное с резонансным переходом электронов из валентной зоны или с локальных уровней в зону проводимости, что приводит к изменению мнимой составляющей показателя преломления и плазменного эффекта, изменяющего действительную часть показателя преломления [7]. При этом, если носители распределены неоднородно, то при промежуточном приложении электрического поля оптический сигнал будет управляться этим электрическим полем. Оба эти явления будут избирательно действовать на световой поток: эффективное поглощение связано с частотой перехода электронов из соответствующего состояния в зону проводимости, а изменения активной составляющей показателя преломления, – с плазменной частотой.

Рассмотрим влияние свободных носителей на действительную часть показателя преломления. При увеличении концентрации свободных носителей показатель преломления должен уменьшаться. Тогда уменьшение концентрации свободных носителей (с помощью примесей), а также при действии приложенного напряжения будет увеличивать показатель преломления, а это, в свою очередь, приведет к образованию планарных волноводов. Так как свободные носители достаточно подвижны, то полупроводник можно рассматривать как плазму. В кристаллической решетке электрическое поле будет ускорять свободные электроны. Тогда  $N$  электронов в единице объема полупроводника создают плотность тока

$$\vec{j}_m = -i(Ne^2/\omega m^*) \vec{E}_{m0}, \quad (1)$$

где  $\vec{j}_m$  – комплексная амплитуда плотности тока;  $e$  – заряд электрона;  $\omega$  – циклическая частота;

$m^*$  – эффективная масса электрона,  $\vec{E}_{m0}$  – комплексная амплитуда напряженности электрического поля. Данный ток складывается с током смещения, и полная плотность тока будет равна

$$i\omega \epsilon_s \vec{E}_{m0} + \vec{j}_m = i\omega \epsilon_s [1 - \omega_p^2/\omega^2] \vec{E}_{m0}, \quad (2)$$

где  $\omega_p = [Ne^2/\epsilon_s m^*]^{1/2}$  – плазменная частота материала, а  $\epsilon = n_s^2 \epsilon_0$  – его диэлектрическая проницаемость. При наличии плазменного эффекта эффективный показатель преломления при свободно движущихся носителях примет вид

$$n = n_s [1 - \omega_p^2/\omega^2]^{1/2}. \quad (3)$$

Следовательно, свободные носители заряда будут уменьшать показатель преломления на величину

$$\Delta n = -\mu_0 e^2 N \lambda^2 / 8 \pi^2 m^* n_s, \quad (4)$$

где  $\lambda$  – длина волны.

Так, для GaAs при  $N = 10^{19} \text{ см}^{-3}$  показатель преломления изменяется на величину  $\Delta n = -0,02$  по сравнению с показателем преломления собственного материала. Этого вполне достаточно для формирования направляющих слоев в полупроводниках. Такая разница в показателях преломления, обусловленная свободными электронами в GaAs, связана с их малой эффективной массой (8% массы свободного электрона).

Электронная подсистема на световую волну влияет двояко. Если световая волна затухает с возбуждением свободных электронов или при неупругом взаимодействии со свободными носителями, то последние играют пассивную роль, заключающуюся в изменении коэффициента поглощения под влиянием внешних факторов. Когда же показатель преломления изменяется за счет плазменного эффекта, то система свободных носителей будет играть активную роль. Из-за зависимости показателя преломления от частоты можно направленно управлять падающим световым потоком (разделять этот поток по частотам, осуществлять взаимодействие различных световых потоков и т.д.).

Тогда с точки зрения волноводных свойств р-n переход [5, 6] можно рассматривать как трехслойную волноводную структуру. Направляющей системой будет служить обедненный слой с показателем преломления  $n_0$ . Световой луч может распространяться параллельно электродам, роль подложки будет играть сильно легированный  $n^+$  – слой с показателем преломления  $n_3$ , а покровным слоем с показателем преломления  $n_i$  будет служить р-область. Эффективная работа такой структуры возможна при близких по величине длинах Дебая и длины волны.

Изменение ширины обедненного слоя даст возможность изменять интенсивность распространяющегося направленного светового луча, т.е. осуществить амплитудную модуляцию интенсивности при управлении лучем за счет плазменного эффекта. При управлении лучем за счет поглощения света происходит изменение соотношения ширины обедненной области и базы образца, где за счет свободных носителей осуществляется поглощение, что так же будет приводить к управлению интенсивностью выходящего из образца света приложенным напряжением.

Таким образом, так как обычно обедненная область составляет малую долю ширины образца, а при поглощении света глубина модуляции определяется отношением ширины обедненной области и объема, то глубина модуляции при управлении поглощением должна быть меньше, нежели при плазменном, когда вся модуляция связана исключительно с изменением ширины обедненного слоя. Это подтверждается экспериментально на изготовленных согласно работ [4 ... 6] модуляторах. Глубина модуляции в них изменялась в пределах 40 ... 50% при изменении тока от 0 до 2А. При управлении же плазменным эффектом глубина модуляции увеличивалась до 75 ... 85%, и при этом уменьшилась в 2 ... 3 раза неоднородность глубины модуляции по сечению луча.

В заключении можно сказать следующее:

– при изменении показателя преломления с помощью плазменного эффекта система свободных носителей заряда играет важную роль, связанную с тем, что из-за зависимости показателя преломления от частоты, а также за счет того, что коэффициенты отражения и пропускания зависят от показателя преломления и являются функциями частоты, можно направленно управлять падающим световым сигналом;

– скорость модуляции при поглощении определяется временем поглощения  $\tau_p$ , а при плазменном управлении – временем максвелловской релаксации  $\tau_m$ . Но так как  $\tau_p \gg \tau_m$ , то плазменное управление обеспечит большую скорость модуляции.

Рассматриваемый плазменный эффект может быть применен для любых методов амплитудной модуляции оптического сигнала и использован в оптике и оптической связи.

### Литература

1. Свечников Г.С. Интегральная оптика / Свечников Г.С. – К. Наукова думка, 1988. – 168 с.
2. Унгер Г.Г. Оптическая связь / Унгер Г.Г. – М.: Связь, 1979. – 264 с.
3. Викулин И.М. Полупроводниковые модуляторы ИК излучения / Викулин И.М., Ирха В.И., Панфилов М.И. – Одесса, 1995. – 50 с.
4. А.с. 1730931 СССР МКИ<sup>3</sup> G 02 F 1/015; 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 1752088 СССР МКИ<sup>3</sup> G 02 F 1/015./ 1/03. Оптический модулятор / В.И.Ирха, Ш.Д.Курмашев, И.М.Викулин, Ю.Н.Максименко.(СССР), заявл.07.08.89; опубл. 3.04.92.
6. Пат. 26020 Україна; МПК G 02 F 1/00./ Оптичний модулятор. – Вікулін І.М., Ирха В.І.; Панфілов М.І.; заявитель и патентообладатель Одесс. нац.акад. связи им. А.С.Попова. – №0200705531; заявл. 21.05.07; опубл. 27.08.07. Бюл. №13.
7. Панфилов М.И. Световоды, управляемые электронами / Панфилов М.И. – Одесса: Наукові праці УДАЗ ім. О.С. Попова. – 2002. – №1. – С.45-49.