

Д. ф.-м. н. Ш. Д. КУРМАШОВ, к. ф.-м. н. В. И. ИРХА,
д. ф.-м. н. И. М. ВИКУЛИН, А. А. ГРАДОБОЕВ

Дата поступления в редакцию
03.06 1998 г.
Оппонент к. т. н. В. В. РЮХТИН

Украина, г. Одесса, Гос. ун-т им. И. И. Мечникова,
Гос. академия связи им. А. С. Попова

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ МАТРИЧНЫЕ ОПТИЧЕСКИЕ МОДУЛЯТОРЫ

Рассмотрены два вида оптических модуляторов: линейные многоэлементные и двухкоординатные матрицы.

Two kinds of optical modulators: linear multicomponents and bicoordinant matrix have been considered.

Важным элементом современной оптоэлектроники являются полупроводниковые оптические модуляторы (ОМ) [1, 2], выполняющие аналоговую модуляцию излучения источника электрическим сигналом. При таком способе модуляции интенсивность (амплитуда), фаза, частота или поляризация излучения изменяются непрерывно, в полном соответствии с изменением параметров передаваемого сообщения. Для введения в световую волну информации помимо дискретных ОМ перспективным представляется использование многоэлементных (матричных, мозаичных) модуляторов, основанных на электрооптических эффектах. Многоэлементные ОМ позволяют обрабатывать параметры излучения, в частности, формировать изображение, т. е. управлять не только яркостными, но и пространственными характеристиками излучения (создание зрительного образа).

Интерес представляет использование матричных ОМ совместно с матричными фотоприемниками (ФП), получившими в настоящее время широкое распространение. Распределение освещенности преобразуется в распределение яркости по выходному каналу ОМ, которое может считываться многоэлементным ФП. С помощью специальной опросной системы (электронная система сканирования) можно произвести последовательный опрос каждого элемента ФП и считывание содержащейся в нем информации. На выходе устройства получают последовательность электрических сигналов, в которой закодирован воспринимаемый образ предмета. Далее этот образ подается на управляющие шины матричного ОМ и вновь, уже скорректированным, приходит на многоэлементный ФП. Такая обратная связь позволяет исправлять недостатки изображения, появляющиеся, например, вследствие рассеяния света, которое определяется аберрациями (искажениями), вносимыми оптической системой.

Система “матричный ОМ — матричный ФП” может выполнять ряд функций. Это своеобразный усилитель сигналов при слабом (по яркостному контрасту) первичном изображении. Система позволяет повысить отношение “сигнал — шум” для каждого фрагмента изображения за счет статистической обработки большого числа измерений. Имеются дополнительные возможности анализа оптического изображения, обработки элементов изображения с применением операций интегрирования, дифференцирования и др. Открывается возможность подавления помех, генерируемых электронными элементами оптоэлектронной системы. Система “матричный ОМ — матричный ФП” позволяет преобразовывать ИК-изображение в видимое и наоборот, т. е. осуществлять спектральное инвертирование оптической информации.

Некоторые типы многоэлементных ОМ описаны в настоящей работе.

Исследовались **линейки ОМ**, каждый элемент которых основан на поглощении ИК-света неравновесными носителями заряда при инжекции из $p-n$ -перехода, смещенного в пропускном направлении. Ячейки матрицы ОМ приведены на **рис. 1**. Каждая ячейка представляет полупроводниковый блок 1 с полупрозрачными инжектирующим 2 и омическим 3

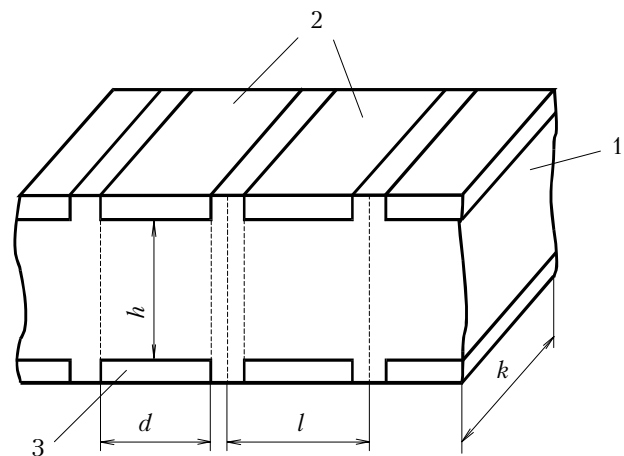


Рис. 1. Матрицы линейного ОМ:
 $h=0,4$ мм; $d=0,4$ мм; $l=0,4$ мм; $k=0,4$ мм

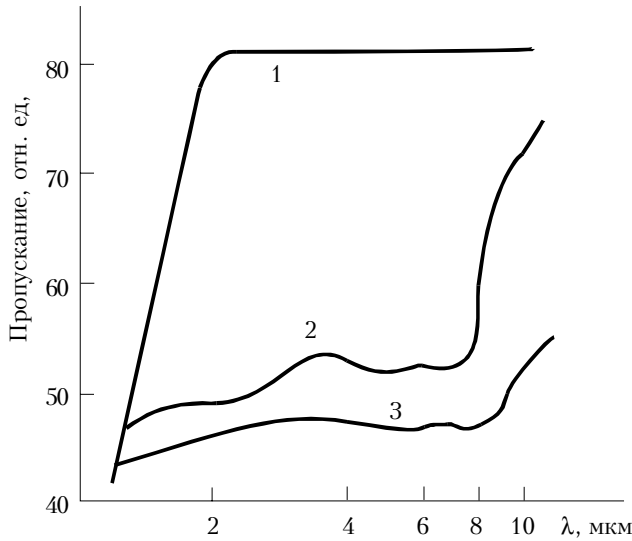


Рис. 2. Спектральные характеристики пропускания модулятора.
Ток инжекции: 1 — 0 А/см²; 2 — 4 А/см²; 3 — 6 А/см²

контактами. Свет падает перпендикулярно плоскости *p-n*-перехода либо с торца базы. Размеры ячейки соответствуют геометрии матриц ФП типа МФ-14 и МФ-16.

Одно из главных требований к материалам, из которых изготавливают инжекционные ОМ, состоит в возможности достижения большой диффузионной длины неосновных носителей заряда ($L_{\text{диф}}$). Для германия $L_{\text{диф}}$ может достигать миллиметра и это является гарантией того, что инжектированные носители заряда заполняют весь объем полупроводникового блока и эффективность модуляции света достаточно высока. На рис. 2 представлены спектральные характеристики пропускания модулятора на основе *n-Ge* с диффузионным *p-n*-переходом при различных значениях прямого тока. Модуляция света начинается при длине волны $\lambda > 1,8$ мкм. Форма спектральной характеристики практически не зависит от плотности тока (J). При $J \approx 2,0$ А/см² глубина модуляции (m) превышает 50%. Она в значительной степени зависит от величины плотности протекающего тока (рис. 3). Эффективность модуляции определялась как

$$m = \frac{I_0 - I}{I_0} 100\%,$$

где I_0 — интенсивность света, прошедшего через модулятор в отсутствие инжекции носителей заряда;
 I — интенсивность прошедшего света при инжекции.

Одной из причин насыщения эффективности модуляции является падение уровня инжекции носителей из *p-n*-перехода при разогреве структуры. Эффективность модуляции снижается при подаче импульсов тока большей длительности.

Для кремния $L_{\text{диф}} = 50 \dots 150$ мкм, что достаточно для эффективной работы ОМ указанной геометрии (рис. 1). *p-n*-переходы на *n-Si* создавали ионной имплантацией. Область инжекции можно уве-

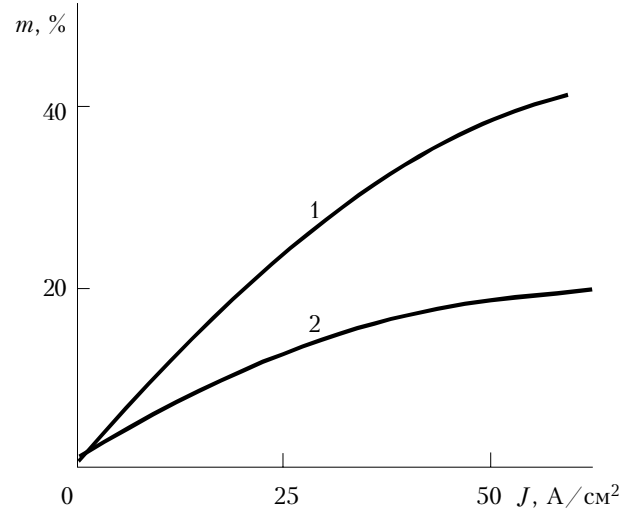


Рис. 3. Зависимость эффективности модуляции от величины плотности тока инжекции:
1 — длительность импульса 200 мкс, частота 30 Гц;
2 — 1 мс, 30 Гц

личить, создавая в объеме кремния встроенные управляющие зарядовые поля при неоднородном легировании базы ячейки ОМ [3]. На рис. 4 показано относительное распределение концентрации неравновесных неосновных носителей (дырок) для модулятора на основе *n-Si* с равномерным и неравномерным распределением примеси. Видно, что при наличии управляющего зарядового поля неоднородность распределения носителей заряда уменьшается в 2–3 раза.

Изучалась возможность создания линейных матриц ОМ на основе бинарных соединений A^3B^5 и их твердых растворов. В данном случае недостатком является относительно небольшая длина диффузии носителей заряда (5–30 мкм). Однако применение в качестве базового материала со встроенными квазиэлектрическими полями (переменная ширина за-

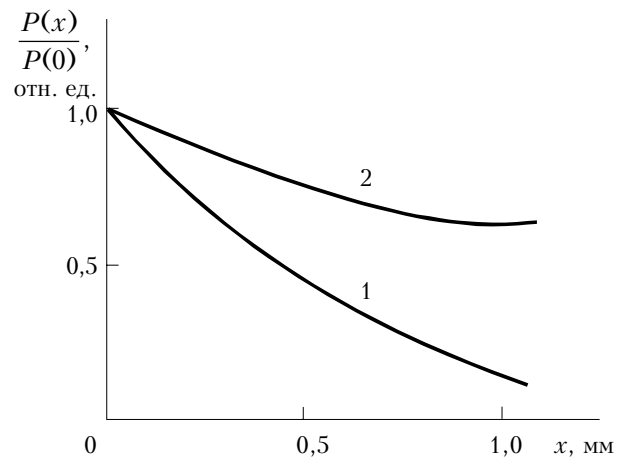


Рис. 4. Распределение концентрации инжектированных носителей в отсутствие (1) и при наличии (2) встроенного квазиэлектрического поля

Материал	T=300 K			T=77 K		
	ρ , Ом·см	U, В	P, Вт/см ²	ρ , Ом·см	U, В	P, Вт/см ²
Ge	30	0,3	0,75	$5 \cdot 10^4$	10	0,5
Si	$5 \cdot 10^3$	5	1	10^5	20	1
Al _x Ga _{1-x} As	$2 \cdot 10^3$	4	0,95	$9 \cdot 10^5$	15	0,8

прещенной зоны [4], неоднородное легирование), а также использование суперинжекции позволяют достичь оптимального коэффициента модуляции света.

Каждый блок модуляторной линейки представляет собой $n^+(Al_xGa_{1-x}As) - p(AI_xGa_{1-x}As) - ^+(GaAs)$ -структуру.

Параметры варизонной базы: длина $h=30-40$ мкм; диффузионная длина электронов $L_{диф} = 6-8$ мкм; максимальная ширина запрещенной зоны $E_g^{max}=1,95$ эВ, минимальная — $E_g^{min}=1,4$ эВ; равновесная концентрация дырок $p_0=6 \cdot 10^{14}$ см⁻³.

Проведены расчеты по тепловыделению матриц ОМ. Принимались во внимание конкретные размеры отдельных блоков и требование, чтобы рассеиваемая мощность (P) не превышала 1 Вт/см². Результаты расчетов приведены в **таблице**. Здесь ρ — удельное сопротивление базы диодной структуры, U — напряжение прямого смещения. Данные приведены для комнатной температуры (300 K) и температуры жидкого азота (77 K). (Величины сопротивления для конкретных линеек выбраны не максимально возможными. В качестве исходных можно взять материалы с большими значениями ρ , что даст возможность уменьшить рассеиваемую мощность.)

Поскольку предполагается стыковка матрицы ОМ с матричным ФП, естественно ожидать взаимного проявления паразитных наводок. Нами установлено, что при толщине диэлектрического зазора ≈ 100 мкм и развязке электрических цепей питания эти наводки практически отсутствуют. Не проявляются электрические наводки внутри модуляторной матрицы при расстоянии между элементами порядка 10–20 мкм. Для ослабления оптической связи между отдельными блоками промежутки поверхности между ними защищались оптически непрозрачными слоями (например, SiO₂).

Двухкоординатная матрица (рис. 5) представляет собой кремниевую полупроводниковую монокристаллическую пластину, на противоположные стороны которой нанесены две взаимно перпендикулярные системы адресных шин-электродов. Электроды на одной из сторон пластины образуют с ней инжектирующий контакт, на противоположной — омический. Часть пластины, заключенная в перекрестии двух шин, представляет собой элемент матрицы ОМ. Через верхние шины на пластину падает свет. Сдвоенные ключи соединяют сканируемую строку и столбец в цепь источника питания и нагрузки, остальные строки и столбцы замыкаются на „землю“. Таким образом „опрашивается“ (т. е. работает в режиме модуляции оптического излучения) участок пластины, лежащий в перекрес-

тии опрашиваемых шин. Интенсивность пучка света, выходящего с тыльной стороны, зависит от тока инжекции, протекающего через активный элемент матрицы. Подключая по заданной программе с помощью соответствующих регистров сдвига (как в ПЗС и ПЗИ) поочередно строки и столбцы, получаем возможность на выходе матрицы сформировать оптическое изображение.

Плотность электродов на верхнем и нижнем основании задается таким образом, чтобы точность (контрастность) получения изображения была не ниже некоторой заданной. Этим, однако, отношение между значениями ширины электродов и зазоров между ними не задается окончательно, т. к. следует учитывать взаимное влияние шин по оптическим и электрическим каналам.

На основе описанных конструкций созданы матричные ОМ для средней ИК-области спектра ($\lambda=6...20$ мкм) с глубиной модуляции не менее 50% и рабочей частотой $f \geq 40$ кГц. Период решетки модулятора не более 100 мкм, толщина не более 0,5 мм, длина полосы $\approx 26,5$ мм.

Важным параметром ОМ является их быстродействие. Оно может быть ограничено временем „остывания“ неравновесных носителей заряда после выключения модулируемого ИК-света, временем жизни, временем „вытягивания“ неравновесных носителей заряда и др. [5]. В данном случае постоянную времени ОМ лимитирует время рассасывания инжектированного в базу заряда электронов и дырок. Это время определяется временем жизни бо-

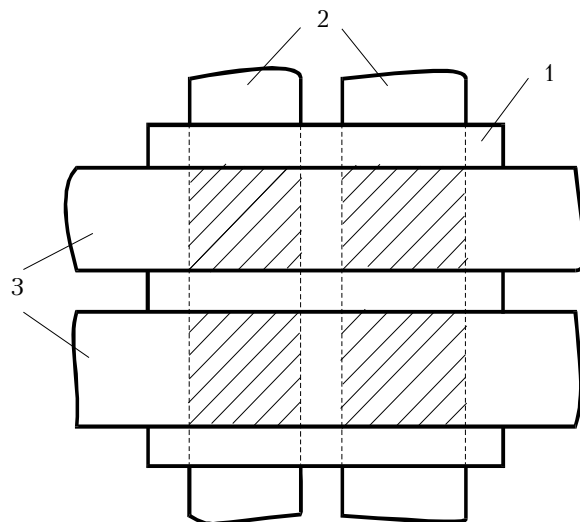


Рис. 5. Двухкоординатная матрица: 1 — полупроводниковая пластинка; 2, 3 — системы адресных шин

лее долгоживущих носителей и составляет $10^{-5} - 10^{-6}$ с. Спад частотной характеристики ОМ происходит по закону $I \sim (1 + \omega^2 \tau^2)^{-1/2}$ (ω — циклическая частота; τ — время жизни носителей заряда) и начинается при частотах $10^5 - 10^6$ Гц.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Свечников С. В. Интегральная оптика. — К. : Наукова думка, 1988.
2. Носов Ю. Р. Оптоэлектроника. — М. : Сов. радио, 1977.

3. Синина И. И., Курмашов Ш. Д., Викулин И. М. Инжекционное усиление фототока в неоднородно легированном полупроводнике // ФТП. — 1986. — Т. 20, вып. 12. — С. 2233—2236.

4. Курмашов Ш. Д., Ирха В. И., Викулин И. М. Спектр fotocувствительности длинных диодов с варизонной базой в магнитном поле // ФТП. — 1990. — Т. 24, вып. 3. — С. 558—560.

5. Викулин И. М., Курмашов Ш. Д., Стафеев В. И. Фотоприемники с инжекционным усилением. — М. : ЦНИИ «Электроника», 1989.

НАУЧНО-ПРОМЫШЛЕННЫЕ ЦЕНТРЫ СНГ



**ГНПП «КБТЭМ-СО» — ОФИЦИАЛЬНЫЙ ДИЛЕР
НЕМЕЦКОГО ФИЛИАЛА ФИРМЫ SMC
В РЕСПУБЛИКЕ БЕЛАРУСЬ**

Корпорация SMC была основана в Японии в 1959 году и за короткий период стала ведущим производителем компонентов промышленной пневматики.

Продукция SMC сертифицирована в соответствии с Международными стандартами качества и безопасности ISO9001.

Компания SMC внимательно отслеживает развитие автоматизации производства и постоянно ведет новые разработки, направленные на создание приборов с меньшими размерами, более высоким быстродействием и с большей степенью интегрирования функций, а также с комбинацией пневматики с электроникой и сенсорными устройствами.

Программа поставок компании SMC включает в себя более чем 6800 единиц продукции и 400000 вариаций их исполнения. Сюда входят:

- Система подготовки сжатого воздуха
- Блоки подготовки сжатого воздуха (фильтры, фильтры тонкой очистки, регуляторы давления, маслораспылители)
- Пневмораспределители с электромагнитным, ручным, пневматическим управлением, дроссели, клапаны, реле давления, датчики сигналов
- Микропневмораспределители
- Цилиндры прямолинейного хода, поворотные приводы, компактные линейные цилиндры, цилиндры короткого хода

• Пневматические захваты

• Вакуумные приборы (генераторы, присоски, переключатели)

• Элементы и детали соединений (фитинги, быстроразъемные соединения, переходники, наконечники, полиуретановые воздушные трубки)

ГНПП «КБТЭМ-СО» предлагает:

- Продукцию высокого качества по конкурентоспособным ценам
- Разработку пневматических схем на базе продукции SMC
- Компоновку отдельных блоков в законченные модули для конкретного применения
- Разработку дополнительных деталей для встраивания пневматических модулей в оборудование
- Монтаж и ремонт пневматического оборудования, проведение пуско-наладочных работ.

**ГНПП «КБТЭМ-СО»
220763, Республика Беларусь
г. Минск, пр. Партизанский, 2
Тел.: (017) 2217-216
Тел./факс: (017) 226-11-49**

А. С. ВОЛКОВ