

ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ ИК ДИАПАЗОНА ($\lambda \geq 1,1$ мкм) ФОТОЧУВСТВИТЕЛЬНОЙ ЖИДКОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ

С. В. Александрович, В. А. Антонов, В. А. Григорьев, Н. Ф. Кошавцев,
И. Н. Компанец, А. В. Парфенов, Р. М. Саввина, В. А. Савельев,
Н. Ф. Стародубцев, В. А. Чапнин

Изложены результаты экспериментов по созданию светомодулирующих структур, чувствительных к возбуждению в ИК диапазоне. В структурах на основе арсенида галлия, компенсированного хромом, получена чувствительность около 10 мкВт/см^2 в диапазоне $1,1 - 2,0$ мкм.

Фоточувствительные жидкокристаллические структуры типа фотопроводник — жидкий кристалл (ЖК) и МДП-ЖК, являются эффективными оптически управляемыми пространственно-временными модуляторами света (ПВМС) и служат, в основном, в качестве преобразователей изображений [2]. В них обычно используются фоточувствительные в данном диапазоне полупроводниковые пленки или монокристаллические пластины силленитов, сульфида или селенида кадмия, высокоомного арсенида галлия и кремния.

Для продвижения спектрального диапазона чувствительности ПВМС в область $\lambda \geq 1,1$ мкм можно было бы использовать узкозонные полупроводники, однако это наталкивается на существенные трудности, заключающиеся в невозможности обеспечить согласование импедансов слоев узкозонного (низкоомного) полупроводника и ЖК, который не может функционировать при низких температурах.

Другим, более перспективным направлением в создании жидкокристаллических ПВМС ИК диапазона может быть использование в них примесных полупроводников, например, полуизолирующего арсенида галлия, компенсированного хромом, железом или кислородом. При введении этих примесей возникает целый спектр уровней глубиной $0,5 - 1,3$ эВ, вследствие чего становится возможным переход носителей заряда в ту или иную зону. Ожидается, что в области спектра $1,3 - 2,0$ мкм чувствительность ПВМС на основе таких полупроводников может составлять величину порядка $1 - 10\%$ от чувствительности тех же ПВМС в видимой области.

Ниже приведены результаты экспериментального исследования структур типа МДП-ЖК для ПВМС, чувствительных в диапазоне $1,1 - 2,0$ мкм. В качестве полупроводников использовались высокоомные монокристаллические материалы: а) арсенид галлия, компенсированный хромом, ванадием и кислородом, с удельным сопротивлением около $10^7 \text{ Ом}\cdot\text{см}$; б) кремний, легированный

никелем и золотом, с удельным сопротивлением около 10^4 Ом·см (характеристики этого материала даны в /3/).

Типичные спектральные кривые фотопроводимости показаны на рис. 1. Они снимались в объемных образцах полупроводников толщиной около 2 мм. Кривые указывают на высокую фоточувствительность материалов в ИК диапазоне, достигающую 10^4 В/Вт для арсенида галлия.

фотопроводимость, В/Вт

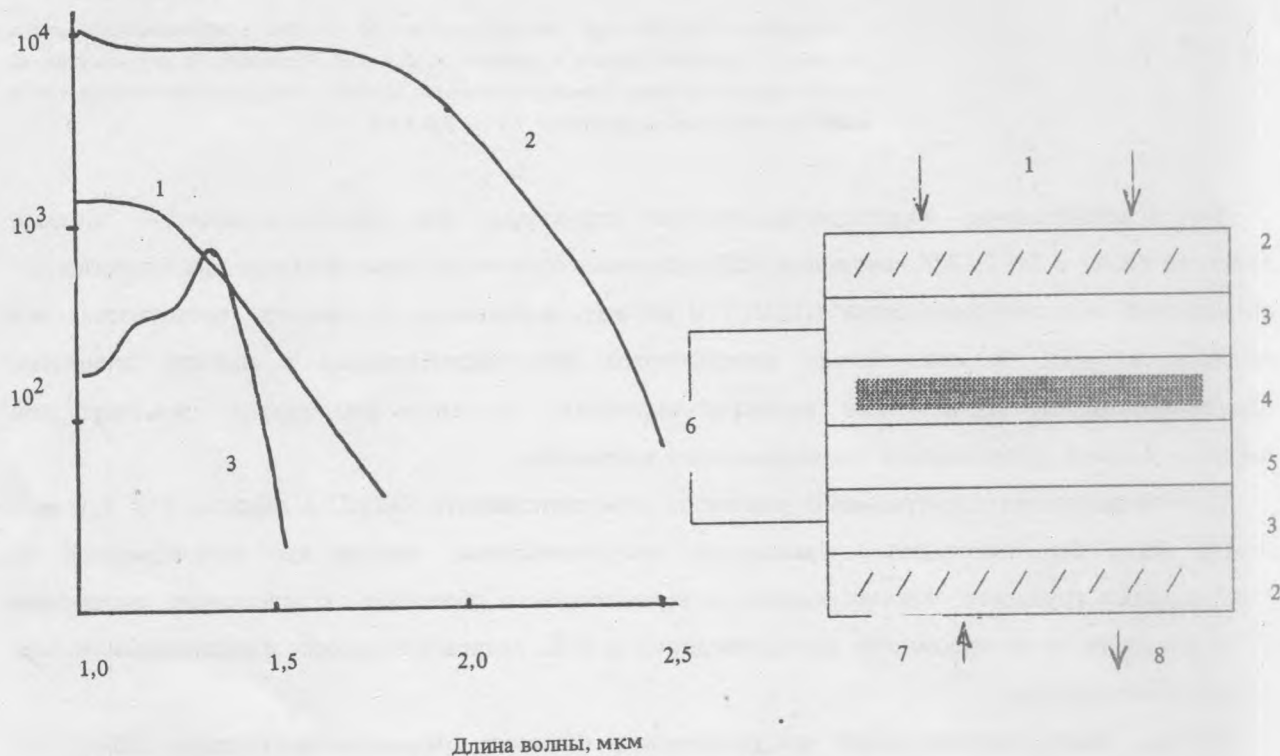


Рис. 1. Спектральные кривые фотопроводимости для фотопроводников: кремний, легированный никелем (1) и золотом (2), арсенид галлия (3).

Рис. 2. Конструкция жидкокристаллической структуры (показана в упрощенном виде): 1 — регистрируемое ИК изображение, 2 — подложки, 3 — прозрачные электроды, 4 — полупроводник, 5 — жидкий кристалл, 6 — источник питающего напряжения, 7 — считывающий поток света, 8 — промодулированный поток света, несущий преобразованное изображение.

Использованные в работе экспериментальные образцы фоточувствительных структур МДП-ЖК близки по конструкции (рис. 2) к ранее исследовавшимся /1, 2, 4/. Использовались нематические ЖК, выпускаемые НИОПиК (ЖК-616 и ЖК-1630). Входное окно (подложка и электрод) прозрачно в области 0,4 — 2,2 мкм. Толщина полупроводниковых пластин составляла около 100 мкм.

Эксперименты по определению параметров фоточувствительных структур (ПВМС) производились по стандартной электрооптической схеме /4/. Одновременно проводились измерения модуляции напряжения на слое ЖК в структуре ПВМС при оптическом возбуждении последней. Для этого в цепь питания структуры помещался конденсатор, напряжение на котором было пропорционально напряжению на слое ЖК, также имеющем емкостной импеданс. Емкость конденсатора выбиралась в диапазоне 0,01 — 0,1 мкФ (в зависимости от площади структуры) так, что напряжение на конденсаторе не превышало 10% от напряжения на слое ЖК (удельная емкость около 3 нФ/см²). Такая методика позволяет при частотах питающего напряжения выше 50 — 100 Гц надежно знать величину самого напряжения на слое ЖК и изменения этого напряжения при возбуждении структуры /5/. Данная методика была применена, в частности, для определения зависимости чувствительности структуры от частоты питающего напряжения. Результаты качественно и количественно близки к результатам измерений чувствительности ПВМС в видимом диапазоне.

С целью определения характера ИК фоточувствительности исследуемых структур были определены зависимости изменения напряжения на слое ЖК от толщины слоя полупроводника при возбуждении структур в видимом и ИК диапазонах. Для этих измерений был изготовлен образец ПВМС, в котором толщина клинообразного слоя полупроводника изменялась от 30 до 100 мкм.

Изменение напряжения ΔU_{lc} на слое ЖК при освещении структуры определяется формулой /1/:

$$\Delta U_{lc} \propto k L_s L_{lc} / (\epsilon_s L_{lc} + \epsilon_{lc} L_s),$$

где: L_s , L_{lc} — соответственно толщина слоя полупроводника и жидкого кристалла; ϵ_s , ϵ_{lc} — диэлектрические проницаемости полупроводника и жидкого кристалла; k — коэффициент, зависящий от характера фоточувствительности и учитывающий ее предельные случаи: поверхностная, когда фоточувствительность обусловлена только поверхностными слоями полупроводника, и объемная, когда фоточувствительные центры расположены равномерно по толщине слоя полупроводника. При поверхностной фоточувствительности $k = \text{const}$ независимо от толщины L_s . Для объемного поглощения $k = 1 - \exp(-\alpha L_s)$, где α — показатель поглощения света. В практически реализуемых случаях для примесного поглощения $\alpha L_s \ll 1$ и $k \approx \alpha L_s$. Тогда для поверхностного возбуждения фотопроводимости

$$\Delta U_{lc} \propto L_s L_{lc} / (\epsilon_s L_{lc} + \epsilon_{lc} L_s), \quad (1)$$

а для объемного возбуждения

$$\Delta U_{lc} \propto L_s^2 L_{lc} / (\epsilon_s L_{lc} + \epsilon_{lc} L_s).$$

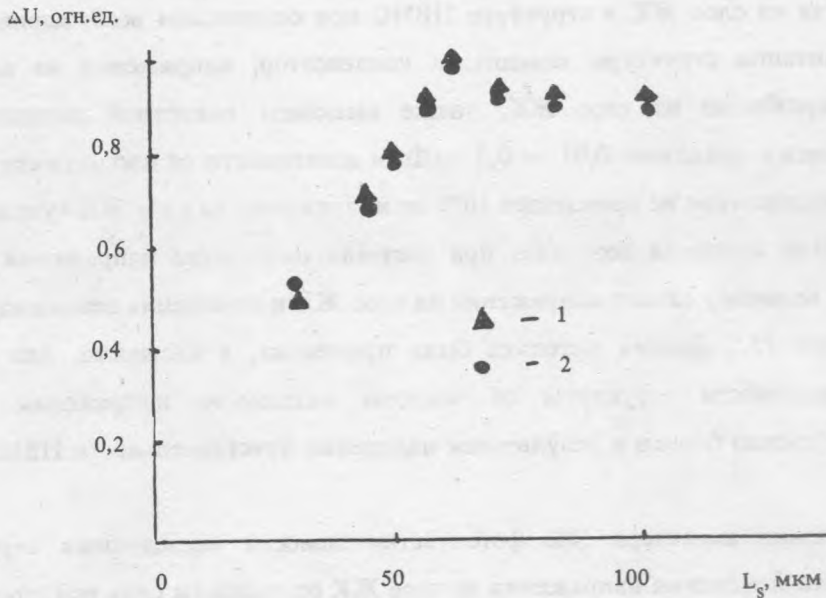


Рис. 3. Зависимость изменения напряжения ΔU на слое жидкого кристалла от толщины полупроводника L_s в структуре: 1 — объемное возбуждение видимым светом, 2 — инфракрасное возбуждение.

Экспериментальные зависимости $\Delta U_{lc}(L_s)$, полученные в видимой и ближней (1,1 — 1,3 мкм) ИК областях спектра, приведены на рис. 3. Характерен значительный участок роста ΔU_{lc} вплоть до толщины полупроводника 60 мкм. Это согласуется с формулой (1), по которой рост должен прекратиться при $L_s = (2-3)L_{lc} \epsilon_s / \epsilon_{lc}$, т.е. при реальных величинах $\epsilon_s = 14$, $\epsilon_{lc} = 6$ и $L_{lc} = 10$ мкм, $L_s = 60-80$ мкм.

Очевидно, что в видимом диапазоне $\alpha L_s \gg 1$, и фоточувствительность носит поверхностный характер. Близость обеих кривых на рис. 3 также свидетельствует в пользу поверхностного механизма. Он может быть, например, следствием того, что ИК фотопроводимость индуцируется свободными носителями заряда. Во время действия импульса питающего напряжения они находятся практически на границах полупроводника, где и очувствляют центры, так как время дрейфа составляет $L_s^2 / \mu U \approx 10^{-8}$ с (здесь μ — подвижность носителей, U — питающее напряжение), что много меньше длительности использованных импульсов напряжения (характерная величина 10^{-3} с). В ряде образцов ПВМС на основе арсенида галлия ИК чувствительность заметно снижалась после химического травления поверхности полупроводника, что свидетельствует о возникновении какого-то количества фоточувствительных центров при механической обработке монокристалла.

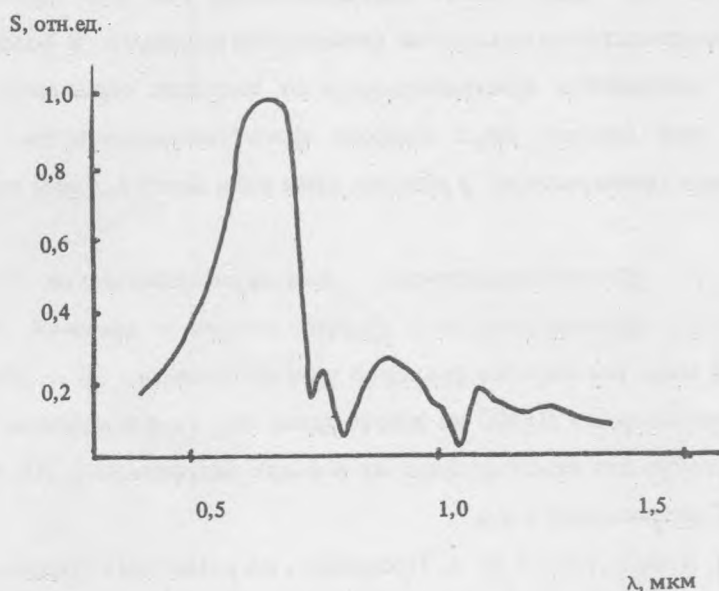


Рис. 4. Спектральная зависимость чувствительности структуры на основе арсенида галлия.

На рис. 4 приведен график спектральной зависимости чувствительности ПВМС на основе полуизолирующего арсенида галлия. Помимо этих данных была измерена интегральная чувствительность данного ПВМС в области 1,6—2,0 мкм (за германиевым фильтром толщиной 100 мкм). Измерения проводились при комнатной температуре в условиях фотовозбуждения полупроводника стационарным видимым (реальный режим работы ПВМС) и импульсным ИК излучением. На спектре ИК чувствительности (рис. 4) выделяются два близких по величине максимума: 0,93 мкм и 1,1 мкм (1,1 эВ). Первый из них, по-видимому, связан с глубоким донором EL2, обусловленным ростовыми дефектами кристаллической решетки арсенида галлия /6/, второй — с глубоким уровнем хрома /7/. Длинноволновый хвост чувствительности, вплоть до 1,8 — 2 мкм, по-видимому, определяется спектром глубоких уровней, связанных с дефектами решетки и примесной атмосферой.

Обращает на себя внимание то, что чувствительность исследованных МДП-структур на основе арсенида галлия в ИК области 1,1 — 1,3 мкм в 5 — 10 раз меньше чувствительности в видимой области (провал в области 0,7 — 0,75 мкм обусловлен интерференционными эффектами в слоях, образующих входное окно ПВМС) и составляет около 10^{-5} Вт/см², а в области 1,6 — 2,0 мкм интегральное значение чувствительности около 10^{-4} Вт/см². Следует также сравнить данные рис. 4 и рис. 1 (фотопроводимость пластины полупроводника), из которых следует, что изменение толщины монокристалла от 2 мкм (рис. 1) до 100 мкм (рис. 4) привело к непропорциональному 3—5-кратному уменьшению ИК чувствительности (относительно максимума чувствительности) в

области 1,1 — 1,3 мкм. Этот факт может восприниматься как еще один довод в пользу обсуждавшегося выше поверхностного механизма фоточувствительности. В более длинноволновой области (1,6 — 2 мкм) зависимость чувствительности от толщины оказывается уже близкой к пропорциональной, из чего следует иная природа фоточувствительности. Чувствительность структур на основе кремния (интегральная) в области длин волн более 1,2 мкм составила $3 \cdot 10^{-5} - 10^{-4}$ Вт/см².

Таким образом, в фоточувствительных жидкокристаллических МДП-структурах, использующих высокоомные компенсированные арсенид галлия и кремний, чувствительные в области длин волн 1 — 2 мкм, реализуется значение чувствительности 10 — 100 мкВт/см². Этого еще недостаточно для использования ПВМС на основе таких структур в качестве приборов ночного видения, но вполне достаточно для использования их в целях визуализации ИК лазерных полей, в лазерной технологии, ИК интроскопии и т.п.

Авторы благодарны П. В. Вашурину и Н. А. Прокопову, на различных стадиях участвовавшим в проведении экспериментов и их подготовке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Васильев А. А. и др. Пространственные модуляторы света. М., Радио и связь, 1987.
2. Вашурин П. В. и др. Препринт ФИАН № 90, М., 1990.
3. Лебедев А. А. Емкостная спектроскопия глубоких центров. Л., Наука, 1978.
4. Думаревский Ю. Д. и др. Квантовая электроника, 11, № 4, 730 (1984).
5. Парфенов А. В. и др. Препринт ФИАН № 81, М., 1982.
6. Martin G. M. in: "Semi-Insulating III-V materials", Nottingham, 1980, p. 1328.
7. M y t s u y u k i O. et al. Jap. J. Appl. Phys., 22, n. 6, p. 345 (1983).

Поступила в редакцию 10 апреля 1992 г.