

53(048)

НАУЧНАЯ СЕССИЯ ОТДЕЛЕНИЯ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ И АСТРОНОМИИ И ОТДЕЛЕНИЯ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ АКАДЕМИИ НАУК СССР (23—24 июня 1976 г.)

23 и 24 июня 1976 г. в конференц-зале Физического института им. П. Н. Лебедева АН СССР состоялась совместная научная сессия Отделения общей физики и астрономии и Отделения ядерной физики АН СССР. На сессии были заслушаны доклады:

1. М. М. Зарипов, И. Б. Хайбуллин, Е. И. Штырков. Отжиг ионно-легированных слоев под действием лазерного излучения.

2. И. А. Смирнов. Редкоземельные полупроводники.

3. Л. П. Пятаевский. Сверхтекучий He^3 .

4. Е. П. Велихов. Управляемый термоядерный синтез. Состояние и перспективы.

5. Ю. Б. Харитон, В. Н. Мохов, В. К. Чернышев, В. Б. Якубов. О работе термоядерных мишеней с магнитным обжатием.

6. Б. Б. Кадомцев. Физика квазистационарных термоядерных систем. Ниже публикуется краткое содержание двух из прочитанных докладов.

621.315.592(048)

М. М. Зарипов, И. Б. Хайбуллин, Е. И. Штырков. Отжиг ионно-легированных слоев под действием лазерного излучения. Принципиальным недостатком метода ионного легирования полупроводников является возникновение в процессе бомбардировки огромного количества радиационных дефектов, вплоть до полной аморфизации облучаемого слоя. Как известно ^{1, 2}, для устранения радиационных нарушений и электрической активации внедренной примеси ионно-легированный слой (ИЛС) подвергают термическому отжигу, т. е. образец нагревают и выдерживают при оптимальной для каждого полупроводника температуре либо в процессе, либо после ионной бомбардировки. В обоих случаях такая операция приводит к целому ряду нежелательных последствий: ухудшению некоторых электрофизических параметров исходного полупроводника, трудноконтролируемому диффузионному перераспределению внедренной примеси, загрязнению ИЛС посторонними примесями и т. д. Эти недостатки термического отжига затрудняют практическую реализацию целого ряда интересных и даже уникальных возможностей метода ионного легирования и тем самым препятствуют более широкому применению его в полупроводниковой электронике.

В ходе работ по исследованию взаимодействия мощных импульсов когерентного излучения с ИЛС, проводимых в Казанском ФТИ КФАН СССР с 1973 г., предложено

и апробирован принципиально новый способ устранения радиационных нарушений — лазерный отжиг³⁻⁴, который обладает целым рядом существенных преимуществ по сравнению с традиционным — термическим. В его основу положен обнаруженный нами эффект фотостимулированной рекристаллизации разупорядоченных ионно-легированных слоев. На примере ИЛС, полученных бомбардировкой Si, Ge, GaAs, ионами B⁺, C⁺, Ne⁺, P⁺, S⁺, Ar⁺, Zn⁺, As⁺, In⁺, Sb⁺ при дозах $6 \cdot 10^{12}$ — $6 \cdot 10^{16}$ ион·см⁻² и энергиях 10—370 кэВ с применением электрических, оптических, электронографических и электронно-микроскопических измерений, показано, что при воздействии на разупорядоченный ИЛС коротким ($\leq 10^{-7}$ сек) мощным ($\sim 10^5$ — 10^8 вт/см²) импульсом когерентного излучения, длина волны которого выбрана в полосе поглощения облучаемого слоя, происходит быстрое (практически за время действия лазерного импульса) восстановление нарушенной кристаллической структуры. Расчет температуры лазерного нагрева слоя, а также экспериментальное исследование кинетики рекристаллизации позволили сделать вывод о том, что механизм лазерного отжига не может быть сведен к чисто тепловому и носит существенно неравновесный характер. Важную роль здесь играют дополнительные факторы, такие, как высокая степень фотоионизации ИЛС ($\sim 10^{18}$ — 10^{19} см⁻³), мощная ударная волна ($(1-2) \cdot 10^3$ атм), сильные световые поля ($\sim 10^4$ — 10^5 в/см) и т. д., которые могут в значительной степени ускорить диффузию радиационных дефектов и, в целом, стимулируют процесс рекристаллизации разупорядоченного слоя⁵. Установлено, что для каждого полупроводника эффект фотостимулированной рекристаллизации наблюдается в определенном диапазоне интенсивностей. Нижний предел определяется порогом рекристаллизации, верхний — порогом светового разрушения данного полупроводника. Оба предела зависят от качества обработки поверхности слоя, режимов ионного легирования, длины волны и длительности импульса лазерного излучения.

Сопоставление результатов исследования эффективности легирования, распределения электроактивных атомов примеси и степени восстановления кристаллической структуры по глубине слоев, полученных при лазерном и термическом отжиге, выявило ряд особенностей лазерного отжига.

Во-первых, при соответствующем выборе параметров лазерного излучения достигается более высокая (до 6—8 раз) степень электрической активации внедренной примеси. Причем этот эффект проявляется тем сильнее, чем больше доза внедренной примеси. Экспериментально установлено, что повышенная электрическая активация внедренной примеси обусловлена стимулированным переходом атомов примеси из междоузельного положения в положение замещения. При этом, благодаря существенно неравновесному характеру лазерного отжига, возможно достижение концентрации атомов примеси в узлах решетки выше предела растворимости ее в твердом кремнии.

Во-вторых, профиль распределения электроактивных атомов примеси определяется не только профилем распределения внедренной примеси, но и распределением поглощенной энергии лазерного излучения по глубине слоя.

В-третьих, в процессе фотостимулированной рекристаллизации практически исключается диффузионное перераспределение внедренной примеси.

В-четвертых, при соответствующем выборе параметров лазерного излучения практически отсутствует термический нагрев исходного материала подложки, благодаря чему предотвращается нежелательное изменение его электрофизических параметров.

В-пятых, используя известные способы формирования заданного пространственного распределения интенсивности светового излучения, можно осуществить отжиг, локальный в трех измерениях.

Указанные особенности ионно-лазерной технологии легирования монокристаллов могут быть наиболее эффективно использованы, в первую очередь, в полупроводниковой микро- и оптоэлектронике при создании твердотельных структур и приборов. Кроме того, эффект фотостимулированной рекристаллизации открывает еще одну область практического применения ИЛС. А именно, на основе обнаруженного эффекта значительного изменения оптических свойств сильно разупорядоченных ИЛС в видимом и особенно в ИК диапазонах спектра при воздействии на них импульсом лазерного излучения открывается возможность использования таких слоев в качестве нового перспективного материала с высоким разрешением (~ 3000 лин/мм) и работоспособного в широком интервале температур для записи и хранения оптической информации, например, голограмм⁵⁻⁷.

Материалы доклада были опубликованы: Отжиг ионно-легированных слоев под действием мощного лазерного излучения, Док. ВИНТИ № 2061-74 (1974); Локальный лазерный отжиг полупроводниковых ионно-легированных слоев, ФТП 9, 2000 (1975); Ионно-легированный слой — новый материал для записи голограмм, Опт. и спектр. 38, 1031 (1975); Лазерный отжиг имплантационных слоев, в кн.: Труды международной конференции по ионному внедрению полупроводников, Будапешт, 1975, с. 242; О механизме лазерного отжига имплантационных слоев, *ibid.*, с. 247, — и докладывались на Всесоюзных и Международной конференциях: а) по оптоэлектронным голографическим запоминающим устройствам, Пенза, 1974 (два доклада); б) по физике взаимодействий

оптического излучения с конденсированными средами, Ленинград, 1974 (один доклад); в) по голографии, Киев, 1975 (один доклад); г) по ионному внедрению полупроводников, Будапешт, 1975 (два доклада); д) по нелинейной оптике, Тбилиси, 1976 (один доклад).

ЛИТЕРАТУРА

1. Дж. Мейер, Л. Эрикссон, Дж. Дэвис, Ионное легирование полупроводников, М., «Мир», 1973.
2. Е. И. Зорин, П. В. Павлов, Д. И. Тетельбаум, Ионное легирование полупроводников, М., «Энергия», 1975.
3. И. Б. Хайбуллин, Е. И. Штырков, М. М. Зарипов, М. Ф. Галаутдинов, Р. М. Баязитов, Деп. ВИНТИ № 2061-74, Москва, 1974.
4. Е. И. Штырков, И. Б. Хайбуллин, М. М. Зарипов, М. Ф. Галаутдинов, Р. М. Баязитов, ФТП 9, 2000 (1975).
5. И. Б. Хайбуллин, Е. И. Штырков, М. М. Зарипов, В. В. Титов, В. П. Страшко, К. П. Кузьмин, в кн. Труды Международной конференции по ионному внедрению в полупроводники, ВНР, Будапешт, 1975, с. 212.
6. И. Б. Хайбуллин, Е. И. Штырков, М. М. Зарипов, М. Ф. Галаутдинов, Е. А. Гуриянский, Авторское свидетельство № 490368 с приоритетом от 25 февраля 1974 г.
7. Е. И. Штырков, И. Б. Хайбуллин, М. М. Зарипов, М. Ф. Галаутдинов, Опт. и спектр. 38, 1031 (1975).

537.311.33:541.65(048)

И. А. Смирнов. Редкоземельные полупроводники. В докладе приводится краткий обзор физических свойств нового класса материалов — редкоземельных полупроводников (РЗП). РЗП — это соединения, в состав которых входит редкоземельный ион с незаполненной внутренней f -оболочкой. В докладе обсуждается специфика РЗП и их отличие от стандартных полупроводниковых материалов Ge, Si соединений $A^{III}B^V$, $A^{IV}B^{VI}$ и др. Большинство РЗП является магнитными полупроводниками.

Основное внимание в докладе обращено на три группы РЗП: 1) монохалькогениды европия (EuX), 2) монохалькогениды самария (SmX) и 3) соединения типа $Ln_2X_3-Ln_3X_4$ ($X = S, Se, Te, Ln$ — редкоземельный металл).

Магнитные полупроводники — халькогениды европия обладают уникальными свойствами. Это — наличие гигантского отрицательного магнитосопротивления (магнитосопротивление изменяется на несколько порядков), появление в ряде составов необычного низкотемпературного (вблизи 50 °K) фазового перехода изолятор — металл, большое «красное смещение» края поглощения, наблюдающееся вблизи температур магнитного упорядочения и сильная его чувствительность к внешнему магнитному полю. Сенсационным можно считать сам факт наличия в изоляторе EuO большой абсолютной величины температуры Кюри (~69 °K). К разряду гигантских эффектов в соединениях EuX относится также резкое изменение физических свойств этих материалов при незначительном их легировании примесями Ln^{+3} , а также необычайно большая величина эффекта Фарадея.

Из соединений SmX в докладе подробно рассмотрены свойства моносulfида самария. В SmS обнаружен изоструктурный ($NaCl-NaCl$) фазовый переход первого рода полупроводник — металл при гидростатическом сжатии ~6,5 кбар при 300 °K. Металлическая фаза SmS обладает рядом необычных свойств, присущих только ограниченному классу соединений. В докладе рассмотрены способы получения металлической модификации моносulfида самария (при гидростатическом сжатии выше 6,5 кбар с помощью образования системы твердых растворов типа $Sm_{1-x}Ln_x^{+3}S$ — «химический коллапс», путем механической полировки полупроводниковых пленок SmS). Для ряда составов в системе твердых растворов обнаружены низкотемпературные и высокотемпературные фазовые переходы металл — полупроводник. В докладе обсуждаются особенности металлической фазы SmS , полученной с помощью механической полировки.

Интересными свойствами обладают системы $Ln_2X_3-Ln_3X_4$. Ln_2X_3 и Ln_3X_4 — это граничные составы одной фазы, в пределах которой сохраняется один и тот же структурный тип, почти не меняется постоянная решетки, но при этом электрические свойства изменяются от изоляторных до металлических. Ln_2X_3 — изолятор с большой шириной запрещенной зоны, в нем каждый 9 узел катодной подрешетки остается пустым, т. е. имеется ~ 10^{21} см^{-3} вакансий. При переходе от Ln_2X_3 к Ln_3X_4 происходит постепенное замещение вакансий ионами Ln и, соответственно, увеличение концентрации носителей тока до ~ 10^{21} см^{-3} . Удельное электросопротивление в пределах фазы

может меняться до 13 порядков. В докладе кратко обсуждаются технологические сложности приготовления монокристаллов и тонких пленок РЗП, возможности практического применения этих материалов, а также организация и постановка работ по проблеме РЗП в СССР и за рубежом.

Доклад составлен по следующим статьям и обзорам:

- P. Wachter, CRC Rev. in Sol. State Sci. 190 (1972).
- А. В. Голубков, Е. В. Гончарова, В. П. Жузе, Г. М. Логинов, В. М. Сергеева, И. А. Смирнов, Физические свойства халькогенидов редкоземельных элементов, Л., «Наука», 1973.
- Т. Л. Бжалава, Т. Б. Жукова, И. А. Смирнов, С. Г. Шильман, Н. А. Яковлева, ФТТ 16, 3753 (1974).
- И. А. Смирнов, доклад на IV Уральской зимней школе по физике полупроводников, Свердловск, 1975.
- В. В. Каминский, А. И. Шелых, Т. Т. Дедегкаев, Т. Б. Жукова, С. Г. Шильман, И. А. Смирнов, ФТТ 17, 1546 (1975).
- С. Г. Шильман, Т. Л. Бжалава, Т. Б. Жукова, Т. Т. Дедегкаев, И. А. Смирнов, *ibid.* с. 2389.
- А. Жауагаман, Р. D. Dernier, L. D. Longinotti, High. Temp.-High Press. 7, 1 (1975).
- В. С. Оскотский, И. А. Смирнов, в кн. Физика и химия редкоземельных полупроводников (обзор), Л., «Наука», ЛО, 1977.
- В. А. Капустин, *ibid.* (обзор).
- С. М. Varma, Rev. Mod. Phys. 48, 219 (1976).