

ВИЗУАЛИЗАЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В ПОЛУИЗОЛИРУЮЩЕМ АРСЕНИДЕ ГАЛЛИЯ

Н. Н. Лебедева, В. И. Орбух, А. Х. Зейналлы

Бакинский государственный университет им. М. Э. Расул-заде, 370145, Баку, Азербайджан
(Получена 11 сентября 1992 г. Принята к печати 12 февраля 1993 г.)

Представлен новый вариант визуализации распределения электропроводности и фоточувствительности в полупроводниковых высокоомных ($\rho > 10^6$ Ом·см) материалах. Используется фотоионизационная система с плоской газоразрядной ячейкой, где исследуемый полупроводник помещается в газоразрядном зазоре между двумя прозрачными металлическими электродами. Электрические неоднородности полупроводника визуализируются в свечении газового разряда и на поверхности полупроводника, обращенной к катоду. Из сравнения полученных изображений с картиной химического травления поверхности полупроводника делается вывод о возможности визуализации этим способом дислокационного узора. Проведен анализ влияния структуры неоднородностей на их разрешение этим методом.

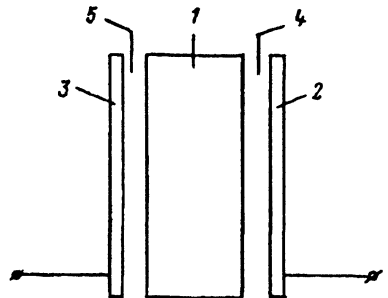
Полуизолирующий GaAs, даже хорошего изготовления, содержит большое число макро- и микродефектов, которые сильно влияют на локальное изменение электрических параметров. Поэтому любая количественная оценка материала, особенно пластин большого диаметра, требует описания пространственного распределения как электрических параметров, так и структурных дефектов.

Материал является полуизолирующим благодаря присутствию глубоких доноров, так называемых *EL2*-центров, которые смещают уровень Ферми к центру запрещенной зоны и обеспечивают электросопротивление порядка 10^7 — 10^8 Ом·см. Из-за участия *EL2*-центров во многих электрических и оптических механизмах за ними признается преимущественная роль в корреляции пространственных нарушений и электрических параметров в GaAs. Этой проблеме были посвящены специальные конференции [1, 2].

Методы визуализации *EL2*-центров используют процессы взаимодействия света с материалом: поглощение, рассеяние, люминесценцию. Полученные картины распределения *EL2* совпадают с данными картирования электрического сопротивления и холловской подвижности. Особый интерес представляет совпадение картин визуализации *EL2* при ИК просвечивании с распределением дислокаций, полученных традиционными методами химического травления поверхности и топограммами *X*-лучей.

Впервые изображение *EL2*-центров в GaAs с помощью ИК пропускания было предложено в [3]. Пластина нелегированного кристалла, полученного по стандартной технологии Чохральского, дает в центральной зоне сетку световых ячеек (размером $200 \div 500$ мкм), ограниченных темными стенками. В периферийной области эти ячейки проявляются как стримеры, часто образующие крест. Одним из доказательств того, что ИК изображение связано с флуктуацией концентрации *EL2*-центров, служили эксперименты по фотогашению *EL2*-центров [4]. Главный аргумент, подтверждающий связь центра *EL2* с дислокацией, основан на наблюдении фотогашения ИК изображения при низких температурах [5, 6]. Такое мнение считалось общепринятым, пока не появились работы Филларда [7-9], где проводился сравнительный анализ картин ИК просвечивания до и после

Рис. 1. Схема газоразрядной ячейки: 1 — полупроводниковая пластина, 2, 3 — прозрачные электроды, 4, 5 — газовые зазоры.



фотогашения и картины распределения дислокаций методом лазерно-сканирующей микроскопии. Было показано, что в арсениде галлия *EL2*-центрами могут быть дефекты атомных размеров, которые расположены в объеме, но концентрируются предпочтительно вокруг дислокации, занимая область, значительно перекрывающую размеры дислокаций.

Таким образом, если ставится задача исследования структуры дислокационного узора и индивидуальных дислокаций, то преимущество за техникой лазерного сканирования, имеющей несравненно высокие по сравнению с техникой ИК просвечивания разрешения; тогда как *EL2*-центры, визуализируемые за счет поглощения ими рассеяния, способны лишь обозначить макрообласти, содержащие дислокации.

Настоящая работа представляет новый вариант визуализации распределения электропроводности по площади пластин полуизолирующего GaAs большого диаметра ($40 \div 100$ мм), используемых в электронной технике.

Известно [10], что если в плоской газоразрядной ячейке протекать один из электродов выполнен в виде полупроводниковой пластины, сопротивление которой $\rho > 10^{-6}$ Ом·см, то газоразрядный ток в ячейке распределяется по всей площади электродов, вызывая равномерное свечение газового разряда. Отсутствие шнурования обеспечивается распределенным сопротивлением полупроводникового электрода. Интенсивность свечения пропорциональна току разряда. Локальное изменение сопротивления полупроводникового электрода приводит к локальным изменениям тока и свечения газового разряда.

В настоящее время на основе такой ячейки с фоточувствительным полупроводниковым электродом (GaAs : Cr, Si : Zn, Si : Pt) созданы устройства для преобразования и фотографирования ИК изображений. Исследуя характеристики таких устройств, нетрудно было убедиться, что они существенно зависят от качества полупроводникового электрода. Часто можно было наблюдать, как при однородной засветке полупроводника образуется неоднородное свечение разряда.

Для изучения этого вопроса мы предложили модифицированную фотоионизационную систему (рис. 1), в которой на обоих свободных поверхностях полупроводниковой пластины осуществляются плазменные контакты. Полупроводниковая пластина (1) с обеих сторон отделена от прозрачных металлических электродов (2, 3), которые представляют собой слой SnO₂ на стекле, тонкими (20—80 мкм) зазорами (4, 5), заполненными газом при понижении давления. При подаче на электроды постоянного напряжения, превышающего напряжение зажигания, по обе стороны от пластины зажигается разряд. Через электрод (2) и зазор (4) полупроводник может равномерно освещаться, через электрод (3) наблюдается картина свечения разряда в зазоре (5). При использовании воздушной газовой среды на электрод (3) подается положительный потенциал, на электрод (2) — отрицательный. Это существенно влияет на результат взаимодействия тока разряда со свободными поверхностями полупроводника. В зазоре (4) поверхность полупроводника бомбардируется электронами и отрицательными ионами газоразрядной плазмы — ионами кислорода, что приводит к нарушению поверхности полупроводника. В зазоре (5) бомбардировке подвергается электрод (3) из SnO₂, а на поверхности полупроводника видимых изменений не наблюдается.

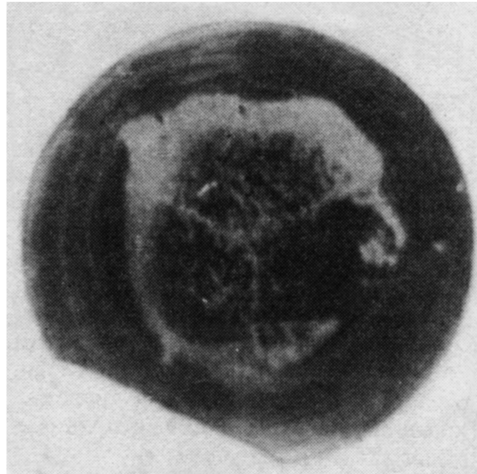
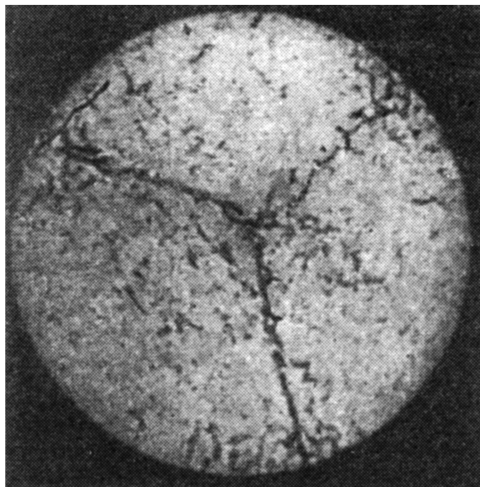


Рис. 2. Фотография свечения газового разряда в зазоре (зазор 5 на рис. 1).

Рис. 3. Фотография поверхности полупроводниковой пластины после ее травления газовым разрядом (в зазоре 4 на рис. 1).

Такая модификация ионизационной системы может быть использована в качестве прибора для визуального контроля однородности проводимости и фоточувствительности полупроводниковых высокоомных материалов при равномерном освещении их поверхности. Как следует из принципа действия ионизационной системы, ток и свечение зависят от локальной проводимости полупроводника, поэтому если в полупроводнике имеют место неоднородности проводимости, то они должны визуализироваться в свечении газового разряда. Если неоднородность проводимости обусловлена флуктуацией $EL2$ -центров, то в устройстве визуализируется распределение $EL2$ -центров.

На рис. 2 представлена фотография свечения разряда в ионизационной системе с полупроводником из полуизолирующего GaAs ($\rho = 10^7$ Ом·см). Со стороны зазора (4) полупроводник освещался светом $\lambda \geq 1$ мкм равномерно по всей площади. Фотография свечения сделана со стороны зазора (5) (рис. 1). Картина свечения формировалась и с противоположной стороны пластины в зазоре (4). Отпечаток картины свечения в зазоре (4) после определенной экспозиции фиксировался на свободной поверхности полупроводника, образующей зазор (4). Фотография этой поверхности полупроводника представлена на рис. 3. Видно, что рисунок, отпечатанный на одной поверхности полупроводника, и фотография свечения газового разряда с противоположной стороны пластины идентичны по основному узору, — три линии, радиально расходящиеся под углом $\sim 120^\circ$. Надо полагать, что в зазоре (4) поверхность под воздействием ионов кислорода подвергается травлению в газовом разряде. Интенсивность травления определяется током и потому картина повреждений газовым травлением поверхности идентична картине свечения разряда.

Таким образом, в модифицированной ионизационной системе картина распределения неоднородности проводимости в пластине GaAs может быть визуализирована в свечении газового разряда и одновременно зафиксирована на ее поверхности. На том же образце было проведено химическое травление поверхности, обращенной к зазору (5), с целью выявления дислокации. Использовался АВ травитель. В результате 5—10-минутного травления при комнатной температуре была выявлена картина травления, приведенная на рис. 4. Идентичность всех трех фотографий по главному узору рисунка — радиально расходящимся линиям — очевидна.

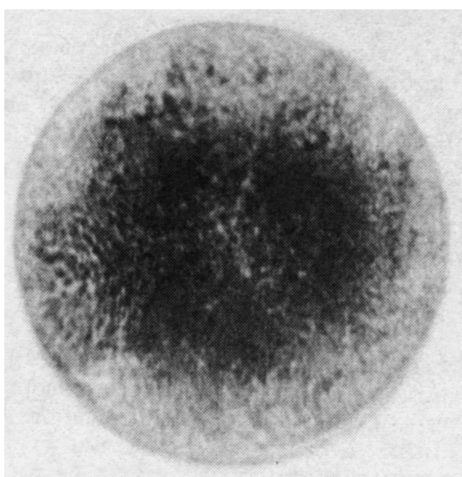


Рис. 4. Фотография поверхности полупроводниковой пластины после химического травления.

Обсуждение

Распределение интенсивности свечения газоразрядной плазмы повторяет распределение тока, который в свою очередь определяется нормальной составляющей тока на границе полупроводника с газоразрядной плазмой. Последнее обстоятельство связано с тем, что сопротивление полупроводника много больше сопротивления газоразрядного зазора. Следовательно, преобразование неоднородности распределения сопротивления полупроводника в распределение тока происходит практически точно с погрешностью $R_{plasma}/R_{semicond} \ll 1$. Дальнейшее преобразование неоднородности тока в неоднородности свечения с последующей регистрацией (в нашем случае это фотография свечения) обеспечивает разрешение не более 10%.

Линейный размер регистрируемой неоднородности по нашим оценкам в конечном итоге определяется шириной газового зазора, который в наших экспериментах был порядка 40÷80 мкм.

Анализ картины свечения разряда должен решить вопрос об эффективности визуализации неоднородностей проводимости в зависимости от их структуры. В случае если масштаб неоднородности превышает десятки микрон, т. е. больше как моно-, так и биполярной длины диффузии, представляется возможным следующее качественное рассмотрение неоднородностей трех типов (рис. 5). Двумерные сквозные неоднородности проводимости, параллельные поверхности (рис. 5, *a*), двумерные сквозные неоднородности, перпендикулярные поверхности (рис. 5, *b*), и трехмерные неоднородности, распределенные по объему полупроводника, размеры которых значительно меньше линейных размеров кристалла (рис. 5, *c*). В случае *a* неоднородность может лишь изменить общий фон свечения через влияние на полную проводимость полупроводника и потому в изображении не проявляется. В случае *b* неоднородность проводимости проявляется наилучшим образом. Тут мы имеем ситуацию параллельно соединенных сопротивлений, по

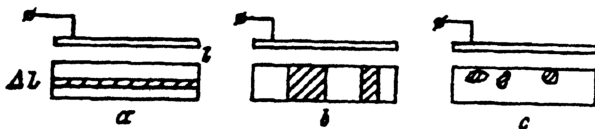


Рис. 5. Схема различных по форме электрических неоднородностей в полупроводниковой пластине.

которым текут разные токи, вызывающие в разряде разную интенсивность свечения. Разрешающая способность при $\Delta l > l$, где Δl — ширина неоднородности, l — ширина газового зазора, вообще не зависит от Δl , и, следовательно, наблюдаемая картина адекватно передает распределение двумерных продольных неоднородностей. При $\Delta l < l$ коэффициент передачи пропорционален $\Delta l/l$. В случае с наблюдаемая картина будет формироваться неоднородностями, находящимися на глубине порядка газового зазора, что следует из условия непрерывности нормальной составляющей тока и потенциала на границе плазма—полупроводник. В этом случае свечение разряда дает картину неоднородностей, усредненную по слою толщиной l .

С учетом этих соображений можно интерпретировать картину свечения разряда (рис. 2). Идентичность основного узора в картине свечения газового разряда и в картине химического травления поверхности говорит о том, что метод позволяет визуализировать структурные несовершенства в полупроводнике. Очевидно, что необходимым условием визуализации структурных дефектов в нашем методе является неоднородность проводимости. Поскольку неоднородность проводимости обусловлена неоднородным распределением $EL2$ -центров, следовательно, структурные дефекты находятся в области неоднородного распределения $EL2$ -центров. В отличие от метода ИК просвечивания структурных несовершенств за счет поглощения только оптически активными $EL2$ -центрами, наш метод визуализирует структурные нарушения за счет флуктуации концентрации центров, определяющей флуктуации проводимости. Совпадение основного узора картины свечения разряда с обеих сторон пластины, одна из которых фотографирована, а другая отпечатывается на самой поверхности, говорит о том, что эти неоднородности проводимости являются сквозными и перпендикулярными к поверхности пластины.

Следовательно, и структурные нарушения, визуализированные в виде трех радиально расходящихся линий, тоже сквозные и перпендикулярны к поверхности полупроводниковой пластины. Другие неоднородности в картине свечения газового разряда можно интерпретировать как неоднородности проводимости, расположенные в слое толщиной порядка ширины газового зазора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] DRIP I Symp. Montpellier 1985, Proc. (ed. by J. P. Fillard) (Elsevier) MS Monographs, 31 (1985).
- [2] DRIP II Symp. Proc. (ed. by E. Weber) (Elsevier) MS Monographs, 44 (1987).
- [3] G. M. Martin, S. Makram-Ebeid. Deep levels in semicon. (ed. by Pantelides) (1983); M. R. Brozel, I. Crant, R. M. Ware, D. J. Stirling. Appl. Phys. Lett., 42, 610 (1983).
- [4] J. Bonnafe, M. de Murcia, M. Castagne, J. P. Fillard. Phys. St. Sol., 76, K147 (1983).
- [5] M. S. Skolnik. DRIP I Symp. (Elsevier) MS Monographs, 31, 165 (1985).
- [6] P. Silverberg, L. Nielsen, P. Omling, L. Samuelson. DRIP I Symp. (Elsevier) MS Monographs, 31, 157 (1985).
- [7] M. Castagne, J. P. Fillard, J. Bonnafe, P. Gall. Def. Semi-Con. (ed. by H. J. von Bardeleben D), 371 (1986).
- [8] J. P. Fillard. Rev. Phys. Appl., 23, 765 (1988).
- [9] J. P. Fillard, M. Asgarinia, M. Castagne, M. Baroudi. Japan. J. Appl. Phys., 27, L899 (1988).
- [10] P. R. Blaszk. United States Patent, 3, 743, 881, July 3 (1973).