

Методика измерения времен релаксации фотопроводимости полупроводника в микроволновом поле при импульсном лазерном излучении

С. И. Расмагин, В. И. Крыштоб

В работе сообщается о методике измерения времен релаксации фотопроводимости в полупроводниковом материале в микроволновом поле после лазерного возбуждения при разных температурах измерения. Анализ кривых релаксации фотопроводимости проводили с помощью метода Прони. Метод Прони позволял определить величину времени релаксации фотопроводимости и парциальные амплитуды сигнала релаксации фотопроводимости. В качестве исследуемого материала использовали образцы кремния электронного типа проводимости, подвергшиеся термической обработке, и прошедшие диффузию золота при высоких температурах. Образцы кремния имели слой вольфрама на поверхности. Получены температурные зависимости величины времени релаксации фотопроводимости. Из этих зависимостей получили температурные зависимости сечения захвата носителей заряда на центры рекомбинации и энергии ионизации различных примесей.

Ключевые слова: полупроводники, кремний, релаксации фотопроводимости, методика микроволнового поля.

Введение

Полупроводниковые материалы, используемые в микроэлектронике, проходят тщательный контроль электрических и фотоэлектрических параметров. Эти параметры определяются, в частности, различными дефектами: атомами примесей, межузельными атомами основного вещества, комплексами примесных атомов с вакансиями, комплексами примесных атомов.

Дефекты влияют на основные параметры особенно сильно, когда возникают энергетические уровни в запрещенной зоне полупроводника. Энергетические уровни оказывают существенное влияние на величины времени жизни носителей заряда и удельного сопротивления, а также тип проводимости. Изменение энергетических уровней дефектов и, соответственно, электрических и фотоэлектрических параметров материала может происходить при термическом воздействии, кото-

рое сопровождает технологические процессы создания полупроводниковых структур [1, 2]. Изменение электрических и фотоэлектрических параметров происходит также во время изготовления электрических контактов. Чтобы исключить такие влияния, контроль параметров материала стремятся осуществлять «бесконтактными» неразрушающими методами измерения. В настоящее время широко используются «бесконтактные» неразрушающие методы, основанные на взаимодействии микроволнового поля с полупроводником [3–7].

В данной работе описана методика получения кривых релаксации фотопроводимости в микроволновом поле в результате лазерного возбуждения материала в широком диапазоне температур. При этом обработка экспериментально полученных кривых релаксации фотопроводимости с целью измерения времен релаксации и парциальных амплитуд проводилась с помощью метода Прони [8] (метода одновременного оценивания экспоненциальных параметров).

Результаты и их обсуждение

Физический принцип примененной методики исследования состоит в следующем: микроволновое поле, энергия кванта которого значительно меньше энергии возбуждения примесных и основных атомов, взаимодействует со свободными но-

Расмагин Сергей Иосифович, научный сотрудник, к.ф.-м.н.
Крыштоб Виталий Ильич, старший научный сотрудник,
к.х.н.

Институт общей физики им. А. М. Прохорова РАН.
Россия, 119991, Москва, Россия, ул. Вавилова, 38.
Тел. 8 (499) 503-87-22. E-mail: rasmag123@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 21 апреля 2017 г.

© Расмагин С. И., Крыштоб В. И., 2017

сителями в разрешенных зонах полупроводника [6, 8]. Это взаимодействие зависит от концентрации носителей в зоне проводимости и валентной зоне. Изменяя концентрацию носителей в вышеупомянутых зонах, изменяем взаимодействие микроволнового поля с носителями заряда, что выражается в изменении мощности отраженной от полупроводника или прошедшей через него волны СВЧ-поля. Избыточная концентрация носителей заряда после выключения внешнего лазерного излучения спадает с некоторым характерным временем (временем релаксации фотопроводимости), определяемым как параметрами рекомбинационных центров, так и уровнями прилипания [9].

В соответствии с изменением избыточной концентрации носителей заряда изменяется, как уже сказано, величина отраженной и прошедшей через полупроводник мощности СВЧ-поля. В определенных условиях это изменение мощности пропорционально изменению концентрации носителей заряда, что и позволяет определить характерное время спада концентрации неравновесных носителей заряда или время релаксации нестационарной фотопроводимости. Измерив величины времен релаксации фотопроводимости при разных температурах в интервале (100–300 К), можно получить информацию о свойствах примесных центров и уровнях прилипания. Наличие уровней прилипания для электронов и дырок может приводить к увеличению наблюдаемого времени релаксации фотопроводимости во много раз в сравнении с временами жизни электронов и дырок, т. е. τ_n и τ_p соответственно [9].

Экспериментальная установка представлена в виде блок-схемы (см. рис. 1). В установке, собранной по данной схеме, анализируется изменение отраженной СВЧ-волны (мощность $P = 1,5\text{--}3$ мВт, длина волны $\lambda = 3$ см) при изменении проводимости полупроводника под действием импульсов излучения лазеров с длинами волн $\lambda_1 = 1,06$ мкм (неодимовый Nd:YAG-лазер с энергией в импульсе $E_{\text{имп.}} = 10$ мДж) и $\lambda_2 = 0,9$ мкм (GaAs-лазер с энергией в импульсе $E_{\text{имп.}} = 800$ нДж). Излучение лазера через оптоволоконно попадало на исследуемый образец, расположенный в криостате. Температура в криостате изменялась в интервале 100–300 К. Под действием импульса лазерного света в полупроводнике создаются неравновесные носители заряда, которые после окончания импульса захватываются на уровни прилипания и рекомбинируют на центрах рекомбинации. В соответствии с изменением избыточной концентрации носителей заряда изменяется величина отраженной мощности СВЧ-поля. Это изменение отраженной мощности регистрируется СВЧ-диодом 3 и поступает на вход широкополосного усилителя 4. После уси-

ления сигнал поступает на цифровой осциллограф с 5 и 8-разрядным АЦП 6, и далее уже цифровой сигнал поступал на СОМ-порт компьютера.

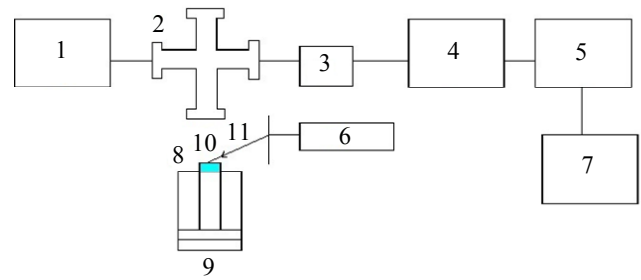


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки: 1 – генератор волн СВЧ; 2 – T-образный мост; 3 – СВЧ-диод; 4 – усилитель; 5 – осциллограф с АЦП; 6 – лазеры ($\lambda_1 = 1,06$ мкм или $\lambda_2 = 0,9$ мкм); 7 – компьютер; 8 – образец; 9 – криостат; 10 – волновод, коаксиальный кабель (СВЧ-петля); 11 – оптоволоконно.

Параметры амплитудно-цифрового преобразования подбирались таким образом, чтобы определить весь частотный диапазон сигнала [10] (интервал дискретизации 50 нс и число отсчетов на кривой спада 2048). Используя методику измерения релаксации фотопроводимости в СВЧ-поле после лазерного возбуждения при разных температурах измерения полупроводников и метод Прони, в конечном итоге, получили температурные зависимости величины времени релаксации фотопроводимости.

В качестве исходного кремния был выбран кремний электронного типа проводимости марки КЭФ-7, выращенный по методу Чохральского. Из исходного кремния получили следующие образцы: группу образцов <1>, прошедших термообработку при температурах $T_1 = 800$ °С, $T_2 = 850$ °С, $T_3 = 900$ °С, $T_4 = 1000$ °С при наличии на поверхности слоя вольфрама; группу образцов <2>, прошедших диффузию золота при наличии на поверхности слоя вольфрама при температурах $T_1 = 900$ °С, $T_2 = 1000$ °С, $T_3 = 1100$ °С. Релаксация фотопроводимости для образцов, прошедших термообработку при наличии слоя вольфрама, имела экспоненциальный характер $U = U_{\text{max}} \exp(-t/\tau)$ с постоянной времени τ , которую и определили как время релаксации фотопроводимости. Релаксация фотопроводимости для образцов, прошедших диффузию золота в исходный кремний при наличии на поверхности слоя вольфрама, характеризуется двумя процессами. Эти два процесса релаксации фотопроводимости (один из которых более быстрый, а другой более медленный) происходят соответственно с двумя разными постоянными времени по закону $U = U_6 \exp(-t/\tau_6) + U_M \exp(-t/\tau_M)$, где τ_6 – время релаксации фото-

проводимости быстрого процесса, τ_m – время релаксации фотопроводимости медленного процесса.

Зависимости величины времени релаксации фотопроводимости от температуры для группы образцов <1> показаны на рис. 2. Из этих температурных зависимостей получили температурные зависимости сечения захвата носителей заряда на центры рекомбинации. Сечения захвата электронов на центры рекомбинации (дефекты термообработки) уменьшается с ростом температуры по степенным законам $\sigma_n \sim T^{-(2,1 \pm 0,3)}$ и $\sigma_p \sim T^{-(3,4 \pm 0,3)}$ в интервале температур 100–300 К. Известно, что в полупроводниках дефекты (в том числе из-за термообработки) изменяют структуру, строение и состав в зависимости от температуры и времени теплового процесса. Это происходит за счет основных и дополнительных примесей в процессе их внутреннего геттерирования и рассасывания, что влияет на электрофизические и фотоэлектрические свойства, в частности, на время жизни носителей заряда (время релаксации фотопроводимости).

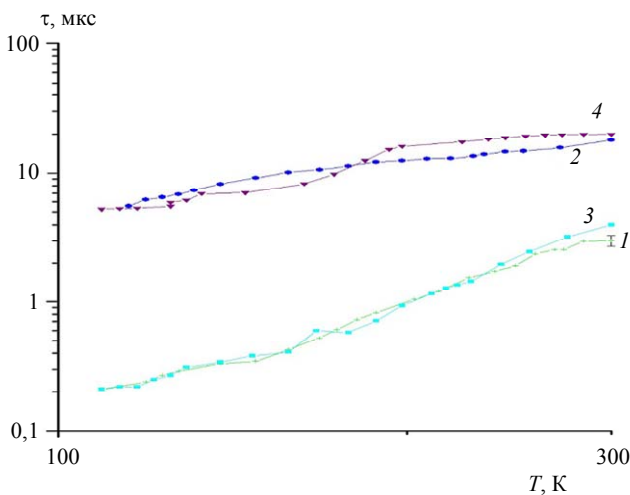


Рис. 2. Зависимость величины времени релаксации фотопроводимости от температуры измерения полупроводника (температурный интервал $T = 100\text{--}300$ К). Высокотемпературный процесс при наличии на поверхности кремния слоя вольфрама. Длина волны возбуждающего лазерного излучения $\lambda_1 = 1,06$ мкм. Температуры термического процесса: кривая 1 – $T_1 = 800$ °С; 2 – $T_2 = 850$ °С; 3 – $T_3 = 900$ °С; 4 – $T_4 = 1000$ °С. Кривые релаксации фотопроводимости характеризовались одной постоянной времени.

В исходном кремнии время релаксации фотопроводимости (ВРФ) составляло порядка 180 мкс при температуре измерения $T = 300$ К. В результате термообработки ВРФ сильно уменьшилось (10–60 раз) в зависимости от температуры термообработки. Так, при температуре термообработки $T_1 = 800$ °С ВРФ составило $\tau = 3$ мкс, при $T_2 = 850$ °С – $\tau = 17$ мкс, при $T_3 = 900$ °С – $\tau = 4$ мкс, при $T_4 = 1000$ °С – $\tau = 18$ мкс при температуре измерения $T = 300$ К. Анализируя вышеприведенные значения и данные рис. 2, можно заключить, что при темпе-

ратуре $T_1 = 800$ °С происходит геттерирование дефектов на поверхность кремния со слоем вольфрама, а при $T_2 = 850$ °С наряду с геттерированием происходит частичное рассасывание термодефектов (что способствует увеличению ВРФ приблизительно в 6 раз). То же самое можно сказать и об образцах при температурах $T_3 = 900$ °С и $T_4 = 1000$ °С.

Температурные зависимости величины времени релаксации фотопроводимости для группы образцов <2> показаны на рис. 3. Из этих температурных зависимостей времени релаксации фотопроводимости с привлечением модели захвата носителей, рассмотренной в работах [7, 9], были получены энергии ионизации уровней прилипания $E_{O+V} = 0,16 \pm 0,01$ эВ, $E_W = 0,23 \pm 0,02$ эВ. Уровень прилипания с энергией $E_{O+V} = 0,16 \pm 0,02$ эВ, очевидно, связан с комплексом кислород+вакансия [10]. Уровень $E_W = 0,23 \pm 0,02$ эВ с большой вероятностью связан с атомами вольфрама [11, 12].

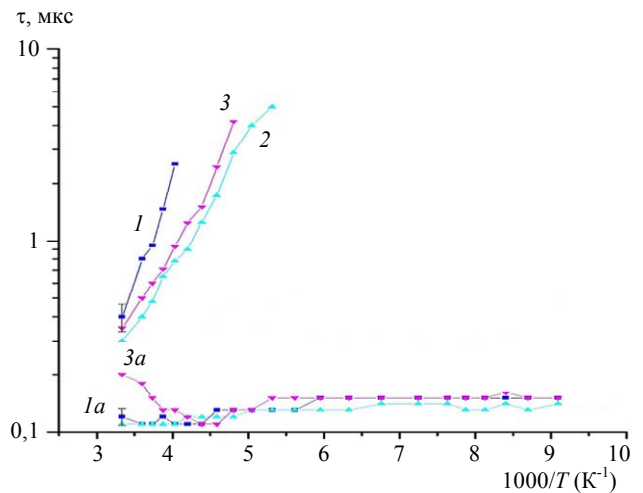


Рис. 3. Зависимости постоянной времени быстро и медленного процессов РФ от величины обратной температуры образца. Диффузия золота в предварительно термообработанный с покрытием вольфрама кремний <ТО, W>+<Au> в течение $t = 5$ часов. Длина волны возбуждающего лазерного излучения $\lambda_2 = 0,9$ мкм. Для температур диффузии $T = 900$ °С, $T = 1000$ °С, $T = 1100$ °С обозначения 1, 2, 3 соответствуют постоянной времени медленного процесса релаксации фотопроводимости, 1а, 2а, 3а соответствуют постоянной времени быстрого процесса релаксации фотопроводимости. Наклоны медленного процесса РФ соответствуют энергиям ионизации примеси: для кривой 1 – $E_W = 0,23 \pm 0,02$ эВ; 2 – $E_{O+V} = 0,16 \pm 0,02$ эВ; 3 – $E_{O+V} = 0,16 \pm 0,02$ эВ.

Заключение

В работе была показана методика получения кривых релаксации фотопроводимости в микроволновом поле после лазерного возбуждения в широком диапазоне температур. Раскрыта возможность с помощью данной методики и метода Прони измерять величины времени релаксации фотопроводимости от температуры. Анализируя

данные зависимости с привлечением различных моделей захвата носителей заряда, получили температурные зависимости сечения захвата электронов на центры рекомбинации (дефекты термообработки) и энергии ионизации уровней прилипания.

Таким образом, методика получения кривых релаксации фотопроводимости в микроволновом поле после лазерного возбуждения в широком диапазоне температур в сочетании с методом Прони позволяет определять «бесконтактным» неразрушающим способом температурные зависимости сечения захвата носителей заряда на центры рекомбинации и энергии ионизации уровней прилипания, которые не обнаруживает традиционная «контактная» методика измерения удельного сопротивления образцов в зависимости от температуры измерения.

Можно сказать, что традиционная «контактная» и «бесконтактная» неразрушающая методики дополняют друг друга и дают более полную информацию о свойствах центров рекомбинации и уровнях прилипания носителей заряда.

ЛИТЕРАТУРА

1. Броддай И., Мерей Дж. Физические основы микро-технологии. – М.: Мир, 1985.
2. Климанов Е. А. // Успехи прикладной физики. 2016. Т. 4. № 5. С. 471.
3. Кирюхин А. Д., Григорьев В. В., Зуев А. В., Зуев В. В. // ФТП. 2008. Т. 42. № 3.
4. Заварицкая Э. И., Кудинов А. В. // ФТП. 1984. Т. 18. № 12. С. 2160.
5. Кирюхин А. Д., Григорьев В. В., Зуев А. В., Зуев В. В., Королев Н. А. // ФТП. 2007. Т. 41. № 3. С. 269.
6. Аношин Ю. А., Базин В. М., Даревский А. С. // ЖТФ. 1989. Т. 59. № 6. С. 165.
7. Быковский Ю. А., Зуев В. В., Кирюхин А. Д., Колосов К. В., Расмагин С. И. // Неорганические материалы. 2000. Т. 36. № 8. С. 749.
8. Марпл С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения. – М.: Мир, 1990.
9. Рывкин С. М. Фотоэлектрические явления в полупроводниках. – М.: ГФМЛ, 1963.
10. Антонова И. В., Мисюк А., Попов В. П. // ФТП. 1997. Т. 31. № 38. С. 998.
11. Fujisaki, Ando T., Rozuka Y., Takato Y. // J. Appl. Phys. 1988. Vol. 63. No. 7. P. 2304.
12. Расмагин С. И. // Неорганические материалы. 2014. Т. 50. № 11. С. 1.

PACS: 81.05.Cy

Method for measuring the relaxation times of the semiconductor photoconductivity in a microwave field under pulsed laser radiation

S. I. Rasmagin and V. I. Kryshstob

Prokhorov General Physics Institute, Russian Academy of Sciences
38 Vavilov str., Moscow, 119991, Russia
E-mail: rasmus123@yandex.ru

Received April 21, 2017

In this paper, we report a technique for measuring the relaxation times of photoconductivity in a semiconductor material in a microwave field after laser excitation at different measurement temperatures. An analysis of the photoconductivity relaxation curves was carried out using the Prony method. The Prony method made it possible to determine the relaxation time of the photoconductivity and the partial amplitudes of the photoconductivity relaxation signal. As the material studied, we used silicon samples of electronic conductivity type subjected to thermal treatment and passed the diffusion of gold at high temperatures. Samples of silicon had a layer of tungsten on the surface. Temperature dependences of the relaxation time of photoconductivity have been obtained. From these dependences, the temperature dependences of the capture cross section of charge carriers on the recombination centers and the ionization energy of various impurities were estimated.

Keywords: semiconductors, silicon, photoconductivity relaxation, microwave field technique.

REFERENCES

1. I. Brodie and J. Muray, *The Physics of Microfabrication* (Plenum Press New York and London, 1982; Mir, Moscow, 1985).
2. E. A. Klimanov, *Usp. Prikl. Fiz.* **4**, 471 (2016).
3. A. D. Kiryukhin, V. V. Grigoriev, A. V. Zuev, and V. V. Zuev, *Semiconductors* **42**, 266 (2008).
4. Je. I. Zavarickaya and A. V. Kudinov, *Semiconductors* **18**, 2160 (1984).
5. A. D. Kiryukhin, V. V. Grigoriev, A. V. Zuev, V. V. Zuev, and N. A. Korolev, *Semiconductors* **41**, 269 (2007).
6. Ju. A. Anoshin, V. M. Bazin, and A. S. Darevskij, *Journal of Applied Physics* **59**, 165 (1989).
7. V. V. Zuev, A. D. Kiryukhin, K. V. Kolosov, and S. I. Rasmagin, *Inorganic Materials* **36**, 749 (2000).
8. S. L. Marpl, *Digital Spectral Analysis and its Applications* (Mir, Moscow, 1990) [in Russian].
9. S. M. Ryvkin, *Photoelectric Phenomena in Semiconductors* (GFML Moscow, 1963) [in Russian].
10. I. V. Antonova, A. Misjuk, and V. P. Popov, *Semiconductors* **31**, 998. (1997).
11. Fujisaki, T. Ando, Y. Rozuka, and Y. Takamo, *J. Appl. Phys.* **63**, 2304 (1988).
12. S. I. Rasmagin, *Inorganic Materials* **50**, 1075 (2014).