

Литература

1. Примаченко В.Е., Кириллова С.И., Чернобай В.А., Венгер Э.Ф. Электронные состояния на Si-SiO₂ граница (обзор). // Физика полупроводников, Квантовая электроника и оптоэлектроника, 8 (4), п. 38-54. 2005.
2. Меньшикова Т.Г., Борمونтов А.Е., Гянджа В.В. Влияние встроенных колебаний заряда на электрофизические характеристики МДП-конструкцию // Вестник ВГУ, Сер. Физика, Математика. № 1, -С. 75- 79. 2005.
3. Озаренко А.В., Брусенцов Ю.А., Королев А.П. Особенности тензорезистивного эффекта в конструкции металл-диэлектрик-полупроводник в условиях статического и неоднородная деформация. // Вестник ТГТУ, 14 (1), п. 158-163, 2008.
4. Климчицкая Г.Л., Федорцов А.Б., Чуркин Ю.В., Юрова В.А. Казимир Форс давление на изолирующий слой в структурах металл-изолятор-полупроводник. // Физика твердого тела State, 53 (9), p. 1921-1926, 2011.
5. Неизвестный И.Г., Гридчин А.А., Применение напряженный кремний в МОП-транзисторах и КМОП структуры. // Российская микроэлектроника, 38 (2), -С. 71- 86. 2009.
6. Власов С.И., Маматкаримов А.А., Овсянников А.В., Сапаров Ф.А. Влияние давления на создание микропространственных включений на поверхностях металл-полупроводниковых структур, в 9-м совместном Узбекско-Корейский симпозиум. Нанонаука: проблемы и перспективы. Квантовые функциональные материалы и Приборы. Рефераты. -С. 29, 2010.
7. Cheng-Yi Peng, Ying-Jhe Yang, Yen-Chun Fu, Ching-Fang Huang, Shu Tong Chang, Chee Wee Liu, Effects of applied mechanical uniaxial and biaxial tensile strain on the flat band voltage of (001), (110), and (111) metal-oxide-silicon capacitors // IEEE Trans. Electron Dev. 56(8), p. 1736-1745, 2009.
8. Зайнабидинов С.З., Власов С.И., Каримов И.Н. Влияние никеля и γ -облучения на плотность поверхностные состояния. // Физ. Техн. Poluprov. 20 (7), п. 1348. 1986.
9. Гайворонский А.Т., Яковлев Ю.И., Береснев Б.И., Булычев Д.К., Гидростат Л.Г. // Приборы и Техника Эксперимента, № 5, -С. 232, 1981.
10. Берман Л.С., Власов С.И., Морозы В.Ф. Идентификация остаточных глубоких примесей в полупроводниковые приборы, использующие переходные процессы спектроскопия // Известия АН СССР. Многосерийный телефильм физика, 42 (6), -С. 1175-1178, 1978.

РЕЗЮМЕ

Бу мақолада уч қаватли конструкцияли Al-n-Si <Ni> -SiO₂ -Al га гидростатик босимнинг таъсир этишидаги релаксацион хараakterистикаси ўрганилди. 15÷20 дақиқа давомида 8 кбар босим берилишида юза ҳолатининг интеграл зичлиги камайишига олиб келиб, бу марказий ҳажм генерациясига таъсир қилмайдиган.

РЕЗЮМЕ

В статье было исследовано (ВГД) на релаксационные характеристики трёхслойных конструкция Al-n-Si <Ni> -SiO₂ -Al. Было установлено, что 15÷20 мин воздействие давления 8 кбар приводит к снижению интегральной плотности поверхностных состояний, не оказывая влияния на центры генерации в объёме.

SUMMARY

The article investigated the effect of hydrostatic pressure on the relaxation characteristics of three-layer structures Al-n-Si<Ni> -SiO₂-Al. It was found that, for 15÷20 min, a pressure of 8 kbar leads to a decrease in the integral density of the state surface without affecting the generation centers in the volume.

СТАТИСТИКА РЕКОМБИНАЦИИ НЕРАВНОВЕСНЫХ НОСИТЕЛЕЙ ДЛЯ ПОЛУПРОВОДНИКОВ С ПАРНЫМИ РЕКОМБИНАЦИОННЫМИ КОМПЛЕКСАМИ, АКТИВНОСТЬ КОТОРЫХ СНИЖАЕТСЯ В ПРОЦЕССЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ

А.Ю.Лейдерман – доктор физико-математических наук, профессор

У.Х.Рахмонов – младший научный сотрудник

Физико-технический институт НПО «Физика–Солнце» АН РУз.

А.К.Утениязов – доктор философии по физико-математическим наукам, доцент

Каракалпакский государственный университет имени Бердаха

М.К.Уктамова – докторант

НИИ Физики полупроводников и микроэлектроники НУУз.

М.Т.Нсанбаев – ассистент преподаватель

Нукусский государственный педагогический институт имени Ажинияза

Таянч сўзлар: рекомбинация, донор-акцептор жуфтлари, рекомбинацион активликнинг пасайиши.

Ключевые слова: рекомбинация, донорно-акцепторные пары, снижение рекомбинационной активности.

Key words: recombination, donor-acceptor pairs, decrease in recombination activity.

Ещё в 50-ые годы прошлого века У.Шокли и У.Рид разработали статистику рекомбинации неравновесных носителей, которая давно уже стала классической. Эта статистика рассматривает модель полупроводника, в котором процесс рекомбинации идёт через простые глубокие примесные центры, каждый из которых может быть либо однозарядным, либо нейтральным. Модель такого полупроводника с одноуровневой глубокой примесью показана на рис. 1.а.

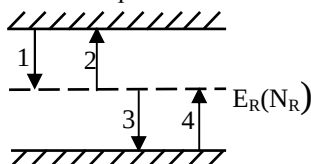


Рис. 1а. Схема рекомбинации через простую одноуровневую ловушку Шокли – Рида.

1 – $c_n N_R (1 - f_R) n$; 2 – $c_n N_R f_R n_1$ обмен уровня ловушки с зоной проводимости,
3 – $c_p N_R f_R p$, 4 – $c_p N_R (1 - f_R) p$ - обмен уровня ловушки с валентной зоной.

При разработке этой статистики авторами были сделаны ряд упрощающих предположений, одним из которых было то, что время закрепления захваченного носителя на примеси незначительно по сравнению со временем, требуемым ловушке, чтобы захватить (или испустить) электрон или дырку. То есть, процесс захвата свободного носителя (электрона или дырки) на примесный центр предполагался без инерционным. Опираясь на эти представления, У. Шокли и У. Рид получили общеизвестное выражение для скорости рекомбинации неравновесных носителей:

$$U = N_R \frac{c_n c_p (pn - n_i^2)}{c_n (n + n_1) + c_p (p + p_1)}. \quad (1)$$

Здесь N_R - концентрация рекомбинационных примесных центров, которая предполагается постоянной; c_n , c_p – коэффициенты захвата электронов и дырок на примесный уровень E_R , n_i – собственная концентрация, n_1 и p_1 – статистические факторы Шокли-Рида,

характеризующие положение примесного уровня E_R в запрещенной зоне полупроводника:

$$n_1 = N_c e^{-\frac{E_c - E_R}{kT}}, \quad p_1 = N_v e^{-\frac{E_v - E_R}{kT}}$$

N_c и N_v – плотности состояний в зоне проводимости и валентной зоне, соответственно, отметим, что член $c_n n_1 = e_n$, т.е. описывает эмиссию электронов с уровня E_R в зону проводимости – процесс, обратный захвату электрона на уровень E_R .

Отметим также, что при достаточно высоком уровне инжекции в условиях квазинейтральности, когда

$$n \approx p > n_1, p_1, \quad (2)$$

выражение (1) упрощается и принимает вид

$$U \approx N_R c_{\phi} p, \quad (3)$$

где $c_{\phi} = \frac{c_n c_p}{c_n + c_p}$ – эффективный коэффициент захвата свободных носителей.

При этом время жизни свободных носителей

$$\tau_p = \frac{p - p_n}{U} = \frac{n - n_n}{U}, \quad (4)$$

так как при высоком уровне возбуждения $p \approx n > p_n, n_n$.

Используя (3), получаем

$$\tau = (c_{\phi} N_R)^{-1} = \text{const}, \quad (5)$$

т.е. время жизни неравновесных носителей при высоком уровне возбуждения является постоянной величиной.

После публикации работы У. Шокли и У. Рида было разработано много других статистик рекомбинации, стремящихся учесть более сложную природу рекомбинационных центров. Во всех этих работах рекомбинация происходит не мгновенно, а с некоторым запаздыванием, т.е. учитывается инерционность процесса. Это происходит потому, что рассматривается рекомбинация не через простую одноуровневую ловушку, а через парные рекомбинационные комплексы той или иной природы. Это могут быть комплексы типа донорно-акцепторной пары или пары типа примесь+вакансия или междоузельный атом + примесь и.т.д. Большая группа этих моделей собрана в работе [1], где получено общее выражение для скорости рекомбинации через парный рекомбинационный комплекс. Одной из последних работ этого направления была работа [2], в которой была рассчитана скорость рекомбинации для полупроводников типа A_3B_5 , содержащих комплексы типа мелкий донор + вакансия. Схема рекомбинации для модели полупроводника с парным рекомбинационным комплексом показано на рис.16.

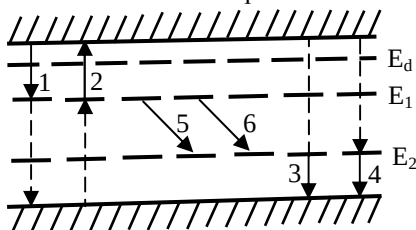


Рис. 16. Схема рекомбинации через парный рекомбинационный комплекс пунктирами показаны не учтенные переходы.

1 – $c_{n1} N_R (1 - f_1)$; 2 – $c_{n1} N_R f_1 n_{11}$ – обмен уровня E_1 с зоной проводимости

3 – $c_{p2} N_R f_2 p$; 4 – $c_{p2} N_R (1 - f_2) p_{12}$ – обмен уровня E_2 с валентной зоной.

5 – $c_{12} N_R f_1 (1 - f_2)$; 6 – $c_{12} N_R f_2 (1 - f_1) e^{-\frac{E_2 - E_1}{kT}}$ – обмен между уровнями E_1 и E_2 , где $(c_{12})^{-1} = \tau_{ii}$ – время внутрикомплексного обмена.

В такой модели скорости рекомбинации электронов U_{cn} и дырок U_{vp} должны быть равны не только между собой, но и скорости внутрикомплексного обмена электронами U_{ii} , т.е. той скорости, которая ответственно за инерционность процесса рекомбинации в целом. Что бы найти общее выражение для скорости рекомбинации надо решить систему из трех уравнений:

$$\begin{cases} U_{cn} = c_{n1} N_R [n - f_1 (n + n_{11})], \\ U_{vp} = c_{p2} N_R [f_2 (p + p_{12} - p_{12})], \\ U_{ii} = c_{12} N_R [f_1 (1 - f_2) - f_2 (1 - f_1)]. \end{cases}$$

Здесь N_R – концентрация комплексов, f_1 и f_2 – вероятности заполнения уровней E_1 и E_2 электронами, c_{n1} – коэффициент захвата электрона на уровень E_1 ; c_{p2} – коэффициент захвата дырки на уровень E_2 , n_{11} и p_{12} – статистические факторы Шокли-Рида для уровней E_1 и E_2 :

$$n_{11} = N_c e^{-\frac{E_c - E_1}{kT}}, \quad p_{12} = N_v e^{-\frac{E_v - E_2}{kT}}$$

Предлагается, что уровни E_1 и E_2 расположены

близко и $\exp^{-\frac{E_1 - E_2}{kT}}$ в расчетах можно пренебречь.

Одним из конкретных примеров парного рекомбинационного комплекса являются такие донорно-акцепторные пары, в которых компоненты находятся на ближайших расстояниях в кристаллической решетке. Например, в GaP ближнюю донорно-акцепторную пару образует комплекс Zn-O. В разных политипах карбида кремния (6Н, 4Н, 3С) четко выраженные акцепторно-донорные пары образуют атомы азота (донор) с алюминием или бором – вакансией углерода ответственна за зеленую люминесценцию, подобные тесные ассоциации существуют и в других широкозонных полупроводниках.

Из системы уравнений (6-8) можно определить вероятности заполнения уровней E_1 и E_2 электронами:

$$f_1 = \frac{c_{n1} n \left[1 + \frac{c_{p2}}{c_{12}} (p + p_{12}) \right] + c_{p2} p_{12}}{c_{n1} (n + n_{11}) + c_{p2} (p + p_{12}) + \frac{c_{n1} c_{p2}}{c_{12}} (n + n_{11}) (p + p_{12})}, \quad (9)$$

$$f_2 = \frac{c_{p2} p_{12} \left[1 + \frac{c_{n1}}{c_{12}} (n + n_{11}) \right] + c_{n1} n}{c_{n1} (n + n_{11}) + c_{p2} (p + p_{12}) + \frac{c_{n1} c_{p2}}{c_{12}} (n + n_{11}) (p + p_{12})}, \quad (10)$$

И затем получить полное выражение для скорости рекомбинации неравновесных носителей

$$U = N_R \frac{c_{n1}c_{p2}(pn - n_i^2)}{c_{n1}(n + n_{11}) + c_{p2}(p + p_{12}) + \frac{c_{n1}c_{p2}}{c_{12}}(pn + p_{12}n + n_{11}p + n_{11}p_{12})} \quad (11)$$

Последний член в знаменателе появляется исключительно только в результате учёта внутрикомплексного обмена. Если время внутрикомплексного обмена

$$\tau_{ii} = \frac{1}{c_{12}} \text{ мало, то этим членам можно пренебречь, и мы}$$

получаем выражение для скорости рекомбинации в виде:

$$U = N_R \frac{c_{n1}c_{p2}(pn - n_i^2)}{c_{n1}(n + n_{11}) + c_{p2}(p + p_{12})} \quad (12)$$

Про которое принято говорить, что оно практически ничем не отличается от выражения (4), соответствующего статистике Шокли-Рида.

С ростом уровня возбуждения в условиях квазинейтральности,

$$p \approx n > n_{11}, p_{12} \quad (13)$$

(11) принимает более простой вид:

$$U = N_R \frac{c_{n1}c_{p2}pn}{(c_{n1} + c_{p2})p + \frac{c_{n1}c_{p2}}{c_{12}}pn} \quad (14)$$

Если второй член в знаменателе становится существенным (но ещё не определяющим), то (14) можно представить в виде

$$U = N_R c_{\text{эфф}} p \left[1 - \frac{c_{n1}c_{p2}}{c_{12}(c_{n1} + c_{p2})} p \right]. \quad (15)$$

Из (15) видно, что скорость рекомбинации больше не растёт линейно с ростом уровня возбуждения, т.е. c_p :

её рост замедляется за счет инерционности внутрикомплексного обмена.

С дальнейшим ростом уровня возбуждения второй член в знаменателе выражения (14) может стать определяющими тогда

$$U = N_R c_{12} \left[1 - \frac{c_{12}(c_{n1} + c_{p2})}{c_{n1}c_{p2}P} \right]. \quad (16)$$

т.е. скорость рекомбинации выходит почти на насыщение, что может служить предвестником развития в материале синергетических процессов [3,4]. Следует отметить, что в этом случае время жизни уже не будет постоянной величиной

$$\tau_p \approx \frac{P}{N_R c_{12}}, \quad (17)$$

т.е. будет расти с ростом уровня возбуждения.

Сходные результаты были получены во всех статистиках рекомбинации, рассматривавших двухуровневый рекомбинационный комплекс, независимо от его конкретной природы. Но ни в одной из этих работ не рассматривалась возможность изменения значений коэффициентов захвата свободных носителей в процессе возбуждения материала. Между тем, такие экспериментальные факты давно известны. При этом весьма распространённым видом внутрикомплексных процессов является зарядовое взаимодействие компонент, образующих комплекс, между собой. Так в CdS [6,4] кулоновское взаимодействие ассоциированных донорной и акцепторной составляющих обуславливает существен-

ное различие величин сечений захвата свободных носителей комплексами.

Межкомпонентное зарядовое взаимодействие должно проявляется в частности в зависимости коэффициента захвата свободных носителей от степени заполнения его компонентов захваченными носителями. Так, в нашей модели простого парного комплекса коэффициент захвата свободных электронов уровнем E_1 может оказаться функцией заполнения захваченными электроном компонента E_2 , т.е. $c_n = c_n(f_2)$

Действительно, если уровне E_1 и E_2 достаточно энергетически близки, а мы рассматриваем именно такую модель, то в силу простого кулоновского взаимодействия, коэффициент захвата электронов на уровень E_1 может зависеть непосредственно от заполнения уровня E_2 электронами, т.е. $c_{n1} = c_{n1}(f_2)$, чем сильнее возбуждение полупроводника, тем меньше вероятность заполнения уровня E_2 электронами, поскольку, как видно из (10) $f_2 \sim \frac{1}{p}$. Следовательно, тем больше

$(1 - f_2)$, т.е. заполнение уровня E_2 дырками растёт с ростом уровня возбуждения. Чем больше дырок на уровне E_2 , тем затруднительнее захвата электронов уровнем E_1 . Для примера рассмотрим самую простую аппроксимацию этого процесса. Зададим зависимость коэффициента захвата электронов на уровень E_1 c_{n1} в виде:

$$c_{n1} = c_{n0}(1 - \alpha p), \quad (18)$$

где α - коэффициент, описывающий процесс влияние заполнения уровня E_2 на процесс захвата электронов уровнем E_1 тогда выражение (12) можно представить как:

$$U = N_R \frac{c_{n0}(1 - \alpha p)c_{p2}(pn - n_i^2)}{c_{n0}(1 - \alpha p)n + c_{n0}n_{11} + c_{p2}(p + p_{12})} \quad (19)$$

Здесь $c_{n0}n_{11} = e$ - эмиссия электронов с уровня E_1 в зону проводимости. Выражение (19) можно представить как

$$U = U_0(1 - \alpha p) + \frac{U_0 c_{n0} \alpha p (1 + \alpha p)}{c_{n0} + c_{p0}}. \quad (20)$$

Поскольку второй член в этом выражение меньше первое, то которое

$$U \approx U_0(1 - \alpha p), \quad (21)$$

где,

$$U_0 = \frac{c_{n0}c_{p2}P}{c_{n0} + c_{p2}}. \quad (21')$$

Таким образом, зависимость $c_n(f_2)$ приводит к убыванию скорости рекомбинации.

Взяв производную $\frac{dU}{dp}$ и приравняв её нулю, можно

найти критическую концентрацию, при которой начинается спад скорости рекомбинации

$$p_{cr} = \frac{1}{2\alpha} \quad (22)$$

Качественно этот процесс представлен на рис. 2

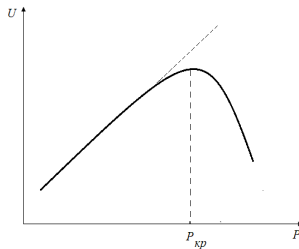


Рис.2. Качественная зависимость изменения скорости рекомбинации от уровня возбуждения в условиях

зависимости $c_n(f_2)$ (18), пунктиром показана зависимость $U(p)$, соответствующая формуле (21).

Таким образом, учёт снижения активности парного рекомбинационного комплекса приводит к уменьшению скорости рекомбинации даже в случае, когда на первый взгляд, повторяется результат, одноуровневой статистики Шокли – Рида. Подчеркнем, что даже в случае пренебрежимо малой инерционности, само наличие парного комплекса может приводить к снижению скорости рекомбинации в процесс возбуждения.

Работа выполнена в рамках гранта ФА-Ф2-003 «Фото-, теплоэлектрические и излучательные эффекты в новых многокомпонентных твердых растворах с нанокристаллами на основе молекул элементарных полупроводников и полупроводниковых соединений» АН РУз.

Литература

1. Лейдерман А.Ю., Минбаева М.К. (1996). Механизм быстрого роста прямого тока в полупроводниковых диодных структурах. ФТП, 1996, т. 30, №10, -С. 1729-1738.
2. Лейдерман А.Ю., Хашаев М.М. Особенности рекомбинации в полупроводниках $A^{III}B^V$. ДАН РУз, №3, -С. 22-24, 2012.
3. Leiderman A.Yu. Applied Solar Energy. 2008, vol. 44, №-2, P. 82-86.
4. Лейдерман А.Ю. Новые синергетические эффекты в полупроводниках. Материалы конференции НПО «Физика - Солнце» АН РУз. –Ташкент: 2016. -С. 152-161.
5. Lang D.W. Logan R.A. Phys. Review Letters, 1977, vol. 39, № -10. -P. 635-638.
6. Гринь Е.Ф., Любченко А.В., Сальков Е.А., Шейнкман М.К. Об излучательной рекомбинации через донорно-акцепторные пары в CdS при низких температурах. ФТП, 1975, т. 9, № 2, -С. 303-310.

РЕЗЮМЕ

Активлиги кўзготиш жараёнида пасажуви жуфт рекомбинацион комплексга эга яримўтказгич модели учун номувозанатий ташувчиларнинг рекомбинация тезлиги ҳисоблаб чиқилди. Рекомбинация тезлиги ифодаси Шокли-Рид классик боғлиқлиги билан мос келганда, биринчи сатҳдаги электрон тутилиши коэффициентининг иккинчи тўлдирилган сатҳга боғлиқлиги ҳаттоки кичик инерцияли рекомбинацион жараёнларда ҳам рекомбинация тезлигининг пасайишига олиб келиши кўрсатилган.

РЕЗЮМЕ

В статье рассчитана скорость рекомбинации неравновесных носителей для модели полупроводника с парным рекомбинационным комплексом, активность которого снижается в процессе возбуждения. Показано, что зависимость коэффициента захвата электрона на первый уровень от заполнения второго уровня приводит к убыванию скорости рекомбинации даже в случае малой инерционности процессов рекомбинации, когда выражение для скорости рекомбинации сходно с классической зависимостью Шокли-Рида.

SUMMARY

In the article recombination rate of non-equilibrium carriers is calculated for a semiconductor model with a pair recombination complex, the activity of which decreases during excitation. It is shown that the dependence of the electron capture coefficient on the first level on the filling of the second level leads to a decrease in the recombination rate even in the case of low inertia of the recombination processes, when the expression for the recombination rate is similar to the classical Shockley-Read dependence.

ЭФФЕКТИВНЫЙ СПОСОБ ПОСТРОЕНИЯ ИНТЕРПОЛЯЦИОННОГО КУБИЧЕСКОГО СПЛАЙНА

А.О.Отаров – кандидат физико-математических наук, профессор

Г.А.Гулмирзаева, С.Д.Ражаббайева - студенты

Каракалпакский государственный университет имени Бердаха

Т.М.Таджиев – сотрудник учебной части

Нукусский государственный педагогический институт имени Ажиязия

Таянч сўзлар: сплайн, лахзалар, мойилликлар, параметрлар, даврилик, панжара, тугунлар, чегаралар шартлари, усул, баркарор.

Ключевые слова: сплайн, моменты, наклоны, параметры, периодичность, сетка, узлы, краевые условия, метод, устойчивый.

Key words: spline, moments, slopes, parameters, periodicity, grid, nodes, regional conditions, method, stable.

В инженерной практике в автоматизации проектирования на ЭВМ, в конструировании кривых и поверхностей, в обработке и представлении геометрической информации, а также в самой математике – в теории аппроксимации, при численном дифференцировании и интегрировании, численном решении дифференциальных и интегральных уравнений наиболее широкое применение получили интерполяционные кубические сплайны [1,2,3]. Это обусловлено тем, что полином третьей степени является простейшая кривая, имеющая точку перегиба, что обеспечивает её хорошие интерпо-

ляционные возможности. Кубические сплайны имеют на всем отрезке аппроксимации непрерывные производные до второго порядка. Такая гладкость обычно оказывается достаточной для большинства задач. Не высокая степень полинома упрощает вычисления и уменьшает вычислительную погрешность.

В данной работе приведён способ, который позволяет эффективно определить параметры кубического сплайна: коэффициенты и моменты при использовании различных краевых условий.

Пусть функция $f(x)$ задана на отрезке $[a, b]$ в узлах сетки $a = x_0 < x_1 < \dots < x_n = b$ значениями $f(x_i) = y_i, i = 0, 1, \dots, n$. Тогда по определению кубический сплайн $S(x)$ задается формулами [1,3]:

$$S(x) = S_i(x), \quad x \in [x_i, x_{i+1}], \quad i = 0, 1, \dots, n-1$$

$$S_i(x) = a_0 + a_1(x - x_i) + a_2(x - x_i)^2 + a_3(x - x_i)^3, \quad i = 0, 1, \dots, n-1 \quad (1)$$

Всего формулы для сплайна содержит $4n$ неизвестных коэффициентов. Выпишем для них уравнения. Из условий интерполяции

$$S_i(x_i) = y_i, \quad i = 0, 1, \dots, n-1,$$

$$S_i(x_{i+1}) = y_{i+1}, \quad i = 0, 1, \dots, n-1,$$

Из условий дважды непрерывной дифференцируемости выполняется