

大带宽半导体光学放大器的理论分析^{*}

张瑞英¹ 董 杰¹ 张 靖¹ 冯志伟² 王 圩¹

(1 中国科学院半导体研究所 国家光电子工艺中心, 北京 100083)

(2 长春光机学院, 长春 130022)

摘要: 提出一种新型的半导体光学放大器结构, 并从增益谱和能带结构等角度分析其特征, 得出其大带宽内偏振不灵敏的原因和规律. 通过剖析该结构中有源区各部分的作用, 得出大的张应变的引入主要是用于提高 TM 模的材料增益, 获得偏振不灵敏和大的 TE 模带宽, 减小制备难度. 厚的无应变层的引入主要是为了改善有源层晶体质量, 获得大的偏振不灵敏模式增益.

关键词: 半导体光学放大器; 渐变应变; 偏振不灵敏; 3dB 带宽

EEACC: 4320J; 2560B; 0170E

中图分类号: TN365

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2002)09-0941-06

1 引言

半导体光学放大器(SOA)是利用半导体有源介质对输入光实现光学放大的被动型功能器件. 由于其易于与其它器件集成, 体积小, 具有快的动态增益响应、非线性好、饱和输出功率高, 可以实现无损操作等特点; 及 SOA 在光通信网络中可实现前置放大、后置放大、中继 3R 再生、光学开关和波长转换等功能, 因而成为光纤通信发展、全光网组建以及 WDM、TDM 技术成熟的关键部件之一^[1]. 其中偏振不灵敏和大的 3dB 带宽是性能优良 SOA 的重要指标, 也是制备技术的难点. 就制备半导体光学放大器而言, 体材料仍然是一种较好的选择. 目前采用体材料制备偏振不灵敏 SOA 的结构有三种: (1) 大光腔结构^[2]. 该结构既可以轻松地实现偏振不灵敏, 又可以获得大的增益, 同时保持好的晶体质量. 但是该结构制备的 SOA 工作电流及热耗散太大, 器件的稳定性差. (2) 窄条宽无应变体材料结构^[3,4]. 与前一种结构相比, 该结构不是通过增加有源区的厚度来实现偏振不灵敏, 而是通过减小有源区的宽度从而分别实现偏振不灵敏的波导结构和偏振不灵敏的材

料增益, 得到宽波长范围和大注入电流范围内的偏振不灵敏, 而且器件的响应度高、线性度高, 是制备偏振不灵敏光学开关的上乘选择. 但是, 制备窄条宽(0.5 μm)的有源区无论采用选择生长的方式, 还是采用刻蚀的办法都不大容易得到. (3) 应变体材料结构^[5]. 该结构是利用张应变可以获得大的 TM 模材料增益来补偿矩形波导中 TM 模光学限制因子小的特点, 从而实现偏振不灵敏. 它克服了窄条宽工艺的困难, 但由于张应变材料临界厚度的限制, 其有源区的晶体质量不可能很高.

本文首次提出一种由体材料构成的新型有源区结构——渐变应变有源区结构, 从理论上说明该结构可以在大带宽范围内获得偏振不灵敏, 并且分析了该结构的偏振不灵敏特性. 实验证明, 采用该种有源区结构制备的半导体光学放大器, 无论偏振灵敏度如何, 均可以获得大的 3dB 带宽.

2 大带宽光学放大器结构设计和制作

2.1 偏振不灵敏有源区结构的设计

鉴于张应变会带来大的 TM 模式增益而张应

^{*} 国家重点基础研究(编号:G20000683-1)和国家自然科学基金(批准号:69896260)资助项目

张瑞英 女, 博士研究生, 主要从事半导体光学放大器的研制和窄条宽选择生长 MOVPE 技术的开发.

2001-12-10 收到, 2002-03-01 定稿

©2002 中国电子学会

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

变层又受到临界厚度的制约,我们提出一种渐变应变结构,同时调整光学限制因子和材料增益以实现偏振不灵敏.如图 1 所示,有源区对称地分布在 60nm 无应变层两边,各层均含有相同的主跃迁波长 $1.55\ \mu\text{m}$,即各层材料电子和轻空穴的复合波长

1.18Q OCL layer	
$d_7 = 15\text{nm}$	1.55Q -0.7%
$d_6 = 20\text{nm}$	1.55Q -0.5%
$d_5 = 25\text{nm}$	1.55Q -0.3%
$d_4 = 60\text{nm}$	1.55Q unstrained
$d_3 = 25\text{nm}$	1.55Q -0.3%
$d_2 = 20\text{nm}$	1.55Q -0.5%
$d_1 = 15\text{nm}$	1.55Q -0.7%

1.18Q OCL layer

图 1 渐变应变有源区结构

Fig. 1 Graded strained bulk-like active layer structure

均为 $1.55\ \mu\text{m}$.上下光学限制层由波长 $1.18\ \mu\text{m}$ 、厚度 $0.2\ \mu\text{m}$ 的材料构成.图 2 给出了该种有源区结构的能带示意图.从图中可以看出,尽管各层材料的主跃迁波长相同,但由于各层材料的相互作用,导带和轻空穴价带均呈谷型分布,各层材料最大台阶不超

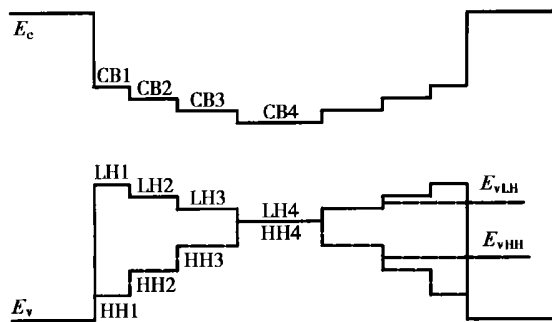


图 2 渐变应变有源区能带结构

Fig. 2 Graded strained bulk-like energy band diagram

过 18meV ,而重空穴价带呈峰型分布,各层材料最大台阶不超过 10meV ,因此空穴和电子的复合随着载流子浓度的增加会均匀地分布在各层材料之间.同时,从能带结构上来看,电子和轻空穴之间的禁带宽度与应变无关,而重空穴和电子之间的禁带宽度则随着张应变的增加而增加,即电子与重空穴的复合波长随着张应变的增加而逐渐蓝移.而且,即使对于应变最大的材料,其轻重空穴带间能级差也只有 27meV .对于半导体光学放大器而言,往往是在大电流下工作.因此,在整个有源区结构中,可以肯

定,轻重空穴都参与复合跃迁.此外,TE 偏振模大部分是由重空穴和电子复合提供,此有源区结构中重空穴和电子的多复合波长存在可以保证 TE 模拥有大的带宽.对于 TM 模,则完全由电子和轻空穴的跃迁提供,TM 模是指电场方向垂直于结平面的偏振模,根据文献[6],由于通常我们考虑的是归一化跃迁矩阵元,因此,电子和空穴的波矢方向与结平面方向垂直,即电子和空穴的复合跃迁方向与结平面垂直,也就是与 TM 模的电场方向平行.根据激光相干原理和动量守恒原理,仅有平行于跃迁方向的轻空穴跃迁才对 TM 模有贡献,而在该方向上,轻空穴的有效质量小,态密度也小,因此,在大电流注入下,本身也可获得多的跃迁能级,从而 TM 模本身可以获得大的带宽.所以,调节该种有源区结构的厚度和应变,可以得到合适的大带宽偏振不灵敏放大.当然,适当优化该种有源区结构,使轻空穴与电子的复合波长也存在一定程度的分布,无疑会使其 3dB 带宽更宽,具体的深入优化工作将会进一步报道.

2.2 器件制作

我们采用低压金属有机气相外延(LP-MOCVD)技术一次外延 InP 缓冲层,波长为 $1.18\ \mu\text{m}$,厚度为 $0.2\ \mu\text{m}$ 的 InGaAsP 上波导层,渐变应变有源层,波长为 $1.18\ \mu\text{m}$,厚度为 $0.2\ \mu\text{m}$ 的 InGaAsP 下波导层以及 InP 盖层,其中渐变有源区包括两种:一种如上所述,另一种是由应变量为 -0.4% (厚度为 15nm)和应变量为 -0.2% (厚度为 20nm)均匀分布于厚度为 100nm 的无应变区构成.然后采用普通的光刻腐蚀技术,刻出 $2\ \mu\text{m}$ 宽的条形结构,二次外延 p-n-p 电流阻挡层结构;之后,三次外延 p-InP 盖层和 p⁺-InGaAs 接触层,光刻腐蚀出 InP 窗口区;最后四次外延 InP 窗口区 $30\ \mu\text{m}$.之后,正面作 Au/Zn/Au 电极,背面作 Au/Ge/Ni 电极.将样片解理成 $660\ \mu\text{m}$ 长的管芯,两端镀 $\text{SiO}_2/\text{SiN}_x$ 增透膜,使之腔面反射率达到 0.04% 以下.

3 理论分析

3.1 宽带宽分析

对于应变体材料,考虑到价带的不对称性,我们采用极坐标,利用 $k \cdot p$ 微扰理论,同时考虑了自旋轨道劈裂和价带间弛豫,得到应变体材料的增益为^[7]:

$$g(\omega) \equiv \frac{\omega}{n_r} \frac{\mu_0}{\epsilon} \int_0^{\pi} \int_0^{\pi} \frac{2\pi k^2 \sin\theta}{(2\pi)^3} M_{cv}^2(f_c(E_c(k)) - f_v(E_v(k, \theta))) \frac{\frac{h}{T_2}}{(E_{cv}(k, \theta) - h\omega)^2 + \left(\frac{h}{T_2}\right)^2} d\theta dk$$

其中 ω 是光频率; n_r 是材料折射率; ϵ 是真空介电常数; μ_0 是真空磁导率; T_2 是带间弛豫时间; $f_c(E_c)$ 和 $f_v(E_v)$ 分别是导带和价带的费米分布函数; M_{cv} 为导带到价带的跃迁矩阵元; h 为普朗克常数; E_{cv} 为导带与价带之间的跃迁能量. 由于半导体光学放大器通常是在大电流下工作, 因此, 我们在模拟过程中假定注入载流子浓度为 $5 \times 10^{18}/\text{cm}^3$. 图 3 给出了根据以上分析, 得到的波长为 $1.55 \mu\text{m}$ 应变量为 -0.4% , -0.2% 以及无应变的 TE 模的材料增益. 从图中可以看出, 三种材料的增益谱峰值强度几乎一致, 但峰值位置随着应变量的增加而逐渐蓝移. 由于渐变应变有源区的增益谱应该是有源区各种材料增益谱的加权平均, 因此, 各种材料 TE 增益谱随应变量的变化呈分散分布可以有效地使整个有源区在大的波长范围获得平坦的增益; 而对于 TM 模, 如前面在能带结构中分析的一样, 其本身亦可获得宽波长范围内的平坦的增益谱. 因此调整各层的应变量和厚度, 可以获得大带宽范围内的偏振不灵敏.

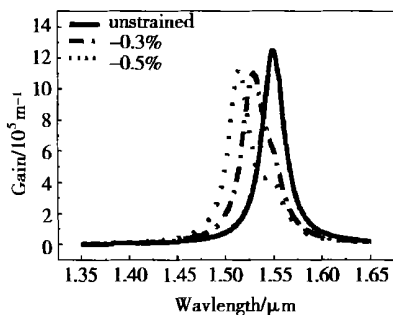


图 3 无应变, 应变量为 -0.2% 、 -0.4% , 波长为 $1.55 \mu\text{m}$ 材料的 TE 模材料增益谱

Fig. 3 TE mode material spectra for lattice-matched, -0.2% , -0.4% strained materials

3.2 偏振不灵敏结构分析

考虑到多层结构, 我们采用复传输矩阵方法, 引入上面得到的相应材料的材料增益, 从而获得偏振不灵敏的模式增益. 图 4 给出了应变量为 -0.4% 层厚度不变时, -0.2% 层厚度和无应变层厚度的相互关系. 可以看出, 随着无应变层厚度的增加, 为了达到偏振不灵敏, -0.2% 层厚度也得相应增加. 对于

该图的一系列结构, 其应变变量固定, 相当于材料增益固定, 改变应变层的厚度, 相当于改变该层的光学限制因子, 因此图 4 表明应变层的光学限制因子对波导偏振特性影响大, 即波导的偏振特性对应变层的

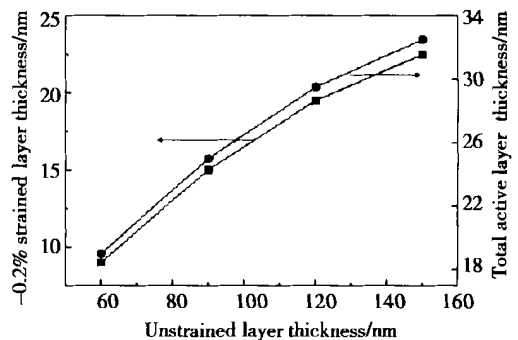


图 4 偏振不灵敏渐变应变有源结构中, 应变层和有源区总厚度随匹配层厚度的变化关系

Fig. 4 Relationship between the strained layer, total layer thickness and the unstrained layer thickness in the polarization-insensitive graded strained bulk-like active structure

厚度更加敏感, 因此, 仔细调节应变层厚度是获得偏振不灵敏的关键. 这是由于在体材料中, 张应变的引入导致轻重空穴简并解除, 电子与轻空穴的复合几率大于电子与重空穴的复合几率, 而电子与轻空穴的复合有 $2/3$ 提供 TM 模的材料增益, $1/6$ 提供 TE 模的材料增益, 结果导致在张应变材料中, TM 模的材料增益大于 TE 模的材料增益. 而在无应变体材料中, 价带的轻重空穴简并, TE 模和 TM 模有相同的材料增益, 因此, 偏振灵敏性对无应变材料的光学限制因子不敏感, 对张应变材料的光学限制因子敏感. 同时, 可以肯定, 这种敏感程度随着张应变量的增加而增加, 图中同时给出在偏振不灵敏结构中, 有源区的总厚度随无应变层的变化也表现出类似的关系. 图 5 给出了该类渐变应变有源区结构的偏振不灵敏增益随无应变层厚度的变化关系, 由图可知, 随着无应变层厚度的增加, 波导的模式增益近线性增加, 同时无应变层厚度的增加也不影响结构的晶体质量. 这也是在该种波导结构中引入无应变层的原因.

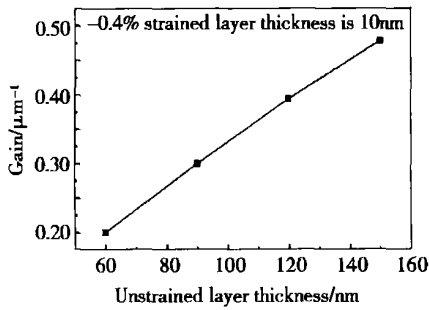


图5 渐变应变结构中,偏振不灵敏模式增益随匹配层厚度变化的关系

Fig. 5 Polarization-insensitive mode gain dependence on the unstrained layer thickness in the graded strained bulk-like active structure

图6给出无应变层厚度分别为50nm和100nm时,应变量为-0.4%层的厚度与应变量为-0.2%层的厚度在获得偏振不灵敏时的相互关系.图6表明,随着-0.2%应变层的厚度增加,-0.4%层的厚

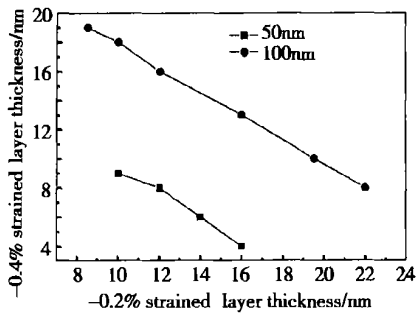


图6 偏振不灵敏渐变应变结构中,各应变层之间的变化关系

Fig. 6 Relationship between the -0.2%, -0.4% strained layer thickness in the polarization-insensitive graded strained bulk-like active structure

度在减小.对于-0.4%应变层,其TM模与TE模材料增益之差肯定大于-0.2%应变层中TM模与TE模增益之差.但是由于-0.4%应变层材料的TE模、TM模材料增益均小于-0.2%应变层材料的TE模、TM模材料增益,因此,-0.4%应变层和-0.2%应变层厚度的微小调节即可获得偏振不灵敏.图7给出无应变层厚度分别为50nm和100nm时,波导增益随-0.2%应变层厚度的变化关系,可以看出,随着-0.2%应变层的厚度变化,波导的增

益几乎无多大变化,但是,随着无应变层厚度的增加,波导的模式增益有明显增加,由此更加表明无应变层在该种有源结构中的引入有利于改善器件模式增益,而应变层的微小调节只是为了获得偏振不灵敏的模式增益,对模式增益的大小改善作用很小.

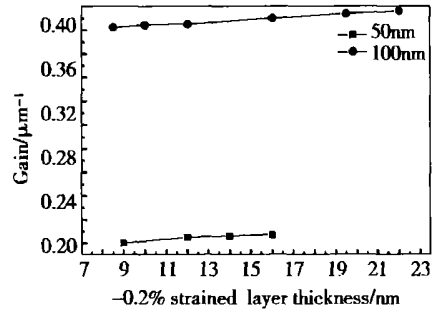


图7 偏振不灵敏渐变应变结构中,偏振不灵敏模式增益随应变层厚度的变化关系

Fig. 7 Polarization-insensitive mode gain dependence on the strained layer thickness in the polarization-insensitive graded strained bulk-like active structure

4 实验结果

图8和图9给出我们所制备的两种结构的SOA自发发射光谱图.其中图8的有源区结构由-0.7%(15nm)、-0.5%(20nm)、-0.3%(25nm)(注:括号内为相应应变层厚度)依次对称的分布在厚度为60nm的无应变层两侧构成.图9的有源区结构由-0.4%(15nm)、0.2%(20nm)依次分布在厚度为100nm的晶格匹配层两侧构成.图8图9所给的SOA的自发发射谱都是在相应管芯的P-I曲线出光功率达5mW下得到的,从而保证放大器在该种工作条件下有较高的增益.从图8和图9可以看出,两种结构的SOA均有大约40nm的3dB带宽.而图8表明,在整个带宽范围内,TM模光谱强度远远大于TE模光谱强度,可以推之,TM模的模式增益也远大于TE模的模式增益,这是大的张应变量和厚的张应变层引入的结果.而图9给出的光谱图,在3dB带宽范围内,其偏振不灵敏度为0.0156dB,且TE模和TM模有几乎相同的3dB带宽范围,表明获得了大约40nm的偏振不灵敏带宽范围.同时图8和图9的实验结果也证明了我们理论分析的正确性.

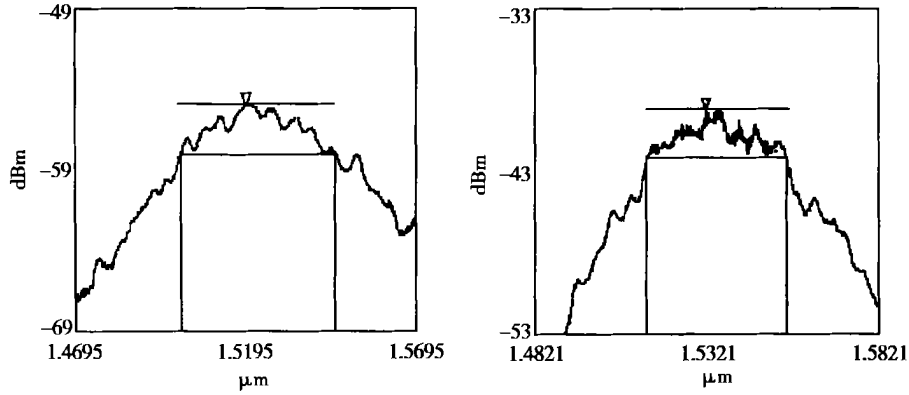


图 8 渐变应变有源区放大器的放大的自发发射谱

Fig. 8 Amplified spontaneous emission spectra measured at driving current of 117 mA for structure A

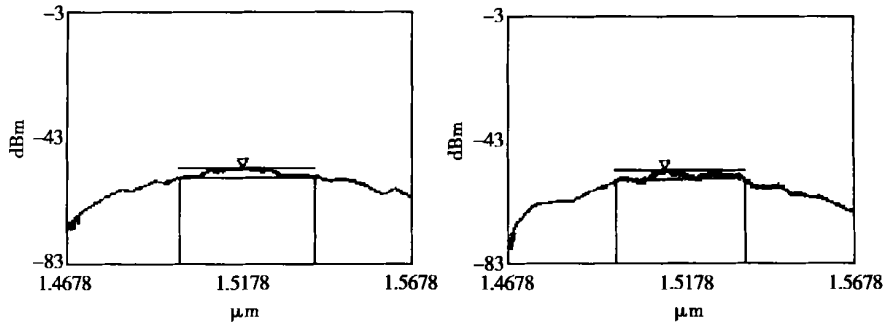


图 9 渐变应变有源结构放大器的放大的自发发射谱

Fig. 9 Amplified spontaneous emission spectra measured at driving current of 90 mA for structure B

5 结论

本文提出一种新型的半导体光学放大器有源区结构,由于该种结构引入渐变应变,因此可以获得大的 3dB 带宽范围,并对该种结构的能带结构、偏振不灵敏模式增益特征进行了分析,认为在该种结构中,引入厚的无应变层既可以改善波导模式增益,同时又可以保证器件的材料质量,而应变层之间的微小调节是为了获得偏振不灵敏.自发发射光谱实验表明,无论是偏振灵敏的半导体光学放大器,还是偏振不灵敏的半导体光学放大器,均有大约 40nm 的 3dB 带宽,而根据我们理论分析设计的 SOA,在其输出功率达 5mW 时,偏振不灵敏度达 0.0156dB, 3dB 带宽范围大约 40nm,适当调节波长范围,可以满足 C 波段光学放大的要求.

参考文献

- [1] Kitamura S, Takahashi S, Kato T, et al. Small switching current SOA gate-OSA, OECC 1996 Tech Dig Ist Makuhari, Japan, 1996, 17D4-2:204
- [2] Saitoh T, Mukai T. Structure design for polarization-insensitive traveling-wave semiconductor optical laser amplifiers. Optical and Quantum Electronics, 1989, 21: S47
- [3] Kitamura S, Hatakeyama H, Hamamoto K, et al. Spot-size converter integrated semiconductor optical amplifiers for optical gate application. IEEE J Quantum Electron, 1999, 35: 1067
- [4] Kato K, Tohmori Y. PLC hybrid integration technology and its application to photonic components. IEEE J Select Topics Quantum Electron, 2000, 6:4
- [5] Bachmann M, Doussiere P, Emery J Y, et al. Polarization-insensitive clamped-gain SOA with integrated spot-size converter and DBR gratings for WDM applications at 1.55 μm wave-

length·Electron Lett, 1996, 32:2076

[6] Chang Cihsheng, Chuang S L· Universal curves for optical-matrix elements of strained quantum wells· Appl Phys Lett, 1995, 66(7) :795

[7] Chang T C· Fonstad C G· Theroetical gain of strained-layer semiconductor lasers in the large strain regime· IEEE J Quantum Electron, 1989, 25:171

Theory Analysis for Semiconductor Optical Amplifier with Large 3dB Bandwidth^{*}

Zhang Ruiying¹, Dong Jie¹, Zhang Jing¹, Feng Zhiwei² and Wang Wei¹

(¹ National Research Center of Optoelectronic Technology, Institute of Semiconductors,

The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100083, China)

(² Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics, Changchun 130022, China)

Abstract: Graded strained bulk-like structure as semiconductor optical amplifier active region is proposed for the first time. Large band width and polarization insensitivity characteristics for such active structure are analyzed from the point of its gain spectra and energy band diagram. Graded tensile strain induced in the active structure is to enhance the TM mode material gain, obtain polarization insensitivity, expand the bandwidth for TE mode gain, and relax the limitation for the stripe width. Unstrained layer induced is primarily used to enhance the polarization insensitive mode gain and improve the active region crystal quality.

Key words: semiconductor optical amplifier; graded strained bulk-like structure; polarization insensitivity; 3dB bandwidth
EEACC: 4320J; 2560B; 0170E

Article ID: 0253-4177(2002)09-0941-06

* Project supported by National Key Basic Research of China (Grant No. G20000683-1) and National Natural Science Foundation of China (No. 69896260)

Zhang Ruiying female, PhD candidate. She is engaged in fabrication of semiconductor optical amplifier and development of NSAG-MOVPE technology.

Received 10 December 2001, revised manuscript received 1 March 2002

©2002 The Chinese Institute of Electronics
(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>